物理学実験Ａ・Ｂ

担当者：木曽田賢治，顧萍

平成 23 年 2 月 10 日

はじめに

本講義，物理学実験 A・B は，中学理科の免許を取得するために必要な単位である。残念ながら，各実験課題の多くは，大学で行われるような高いレベルの実験ではなく中学校理科一分野から高等学校物理で行われる実験とほぼ同等である。
物理学実験は，講義科目としての物理学と車の両輪であってどちらか一方を受講するのでは不十分である。従って本実験を受講する人は，物理の理論的素養をある程度期待されている。すなわち，本学で開講されている物理学 A, 物理学概論 A 及び B 程度の内容は既に既知であると仮定されている。実験結果の検討には高等学校における物理の教科書が大変参考になる。
この実験指導書の他，教科書兼参考書として

吉川泰三編「改訂新版　物理学実験」学術図書出版

も参照しなさい。また，次のホームページも参照しなさい。

http://www.wakayama-u.ac.jp/˜ kisoda/jn/indexj.html

及びここから物理学実験に関する部分も参照しなさい。

目 次

はじめに **i**

第 1 章　実験手順に関する事柄 **1**
1.1　実験全般に関する事 1
1.2　予習 2
1.3　実験 2
1.4　レポート 2

第 2 章　基本的な測定装置測定器具の取り扱い **5**
2.1　長さ、質量、時間 5
2.1.1　長さの測定 5
2.1.2　質量の測定 7
2.1.3　時間の測定 9
2.2　フォルタン Fortin の気圧計 9
2.3　電子計測機器 10
2.3.1　直流安定化電源 10
2.3.2　（デジタル式）テスター 11
2.3.3　デジタルマルチメーター (DMM) 13
2.4　基本的な測定器に関する実習 14
2.4.1　ノギス，マイクロメーター 14
2.4.2　テスター 14
2.4.3　総合課題 14

第 3 章　実験データの処理 **17**
3.1　測定の種類 17
3.2　グラフ 17
3.2.1　グラフの種類 18
3.3　測定の誤差 18
3.3.1　誤差 18
3.3.2　誤差の種類 18
3.4　偶然誤差の取り扱い 19
3.4.1　偶然誤差 19
3.4.2　偶然誤差の取り扱い 19

3.5 実験データの処理 20
3.5.1 有効数字と数値計算 20
3.5.2 補正 20
3.5.3 測定結果の表現法 21
3.5.4 実験式と実験曲線 21
3.5.5 最小自乗法 22
3.6 課題 23
3.6.1 計算機の利用 23

第 4 章 安全の手引き **24**
4.1 薬品の取り扱い 24
4.2 高圧ボンベ 25
4.3 強力な磁石の取り扱い 25
4.4 高温（電気炉）を取り扱うときの注意点 26
4.5 液体窒素取り扱いに関する注意点 27
4.5.1 液体窒素の性質 27
4.5.2 液体窒素取り扱いに関する注意点 27
4.5.3 救急処置 27
4.6 光 28
4.6.1 レーザー 28
4.6.2 紫外線, 放射線 28
4.7 その他当たり前のこと 28
4.8 事故への対応 29

第 5 章 統計実験 **31**
5.1 実験手順 31
5.2 付録 33
5.2.1 誤差の処理 34
5.2.2 誤差の分布 35

第 6 章 気体分子運動のモデル実験 **37**
6.1 理論 37
6.2 実験方法 37
6.3 課題 38

第 7 章 オシロスコープの使用法 **39**
7.1 オシロスコープの構造と機能 39
7.2 オシロスコープの実際 40
7.3 ファンクションジェネレーター（発振器） 45
7.4 オシロスコープの実習 47
7.4.1 測定前のチェック 47

7.4.2 オシロスコープとファンクションジェネレーター . . . 47
7.4.3 音の観測 . . . 47
7.4.4 図形による周波数の測定 . . . 48
7.4.5 報告事項と課題 . . . 50

第 8 章 単振り子の周期 51
8.1 理論 . . . 51
8.2 実験方法 . . . 52
8.3 参考 . . . 52

第 9 章 センサープロジェクト–暗くなると電灯が点く回路を作る– 54
9.1 電気回路の基礎事項 . . . 54
9.1.1 オームの法則 . . . 54
9.1.2 電位分割 . . . 54
9.1.3 光依存抵抗 . . . 55
9.2 実験方法 . . . 55
9.2.1 実験手順 . . . 55
9.2.2 硫化カドミウム (CdS) の特性 . . . 56
9.2.3 発光ダイオードの特性 . . . 56
9.2.4 回路の製作 . . . 56
9.2.5 補足事項 . . . 57

第 10 章 デジタルマルチメーターの実習—Stefan-Boltzmann の法則 59
10.1 実験手順 . . . 59
10.2 課題 . . . 62

第 11 章 熱の仕事等量 J の測定（未完成） 63
11.1 理論 . . . 63

第 12 章 熱電対の利用 64
12.1 理論 . . . 64
12.1.1 温度の定義 . . . 64
12.1.2 熱電対 . . . 64
12.2 実験 . . . 65
12.2.1 熱電対の校正 . . . 65
12.2.2 エチルアルコールの融点または凝固点 . . . 66
12.3 課題 . . . 68
12.4 アルメルクロメル標準熱起電力表 . . . 68

第 13 章 コンデンサーの充放電 **70**
13.1 予備知識 70
13.2 実験方法 72
13.2.1 実験手順 72
13.2.2 充電特性の測定方法。 73
13.2.3 放電特性の測定 73
13.3 データの整理と考察 73
13.4 電源と電圧の分割 75

第 14 章 レンズ及び球面鏡の働き（光学台） **77**
14.1 光学部品の働き 77
14.1.1 レンズの働き 77
14.1.2 凸レンズの働き 77
14.1.3 凹レンズの働き 81
14.1.4 球面鏡の働き 83
14.2 装置と器具 83
14.3 実験方法 84
14.3.1 凸レンズによる景色の結像 84
14.3.2 結像位置の公式，倍率の公式 84
14.3.3 凹レンズの焦点距離の測定 84
14.4 課題 85

第 15 章 光の回折 **86**
15.1 光の回折現象 86
15.2 レーザーポインターを用いた回折実験（波長の決定） 87
15.2.1 実験手順 87
15.3 課題 88

第 16 章 気柱の共鳴 **89**
16.1 理論 89
16.2 実験手順 90
16.3 課題 91

第 17 章 データロガーの使用方法 **93**
17.1 実験手順 93
17.1.1 温度センサーを用いて氷が溶解する過程の温度変化測定 93
17.1.2 力センサーを用いて作用と反作用の力を測定する . . . 93

第 18 章 太陽電池の負荷特性実験 **95**
18.1 太陽電池の動作原理 95
18.1.1 金属，半導体，絶縁体 95

18.1.2 pn 接合と太陽電池 97
18.1.3 太陽電池の特性 99
18.2 照度の測定 99
18.3 太陽電池の特性曲線 100
18.4 課題 100

謝辞と参考文献 **103**

第１章　実験手順に関する事柄

1.1　実験全般に関する事

実験を始める前に，その実験の目的，そこで用いられる基礎概念を理解しておかなければならない。そのためには，本来実験指導書などを**予習**しておかなければならない。また，基本的な測定装置の使用方法（次章），グラフの書き方，有効数字などについても事前に調べておかなければならない。その他実験ノートを用意し，その中に理解した事柄をまとめる習慣を付けておくのも良い。実験終了後には必ず最終結果やグラフを提示して我々の点検を受け，後片付けをしてから帰る。後日指定した場所にレポートを提出する。
実験に必ず持参するものとして，**教科書，実験ノート，グラフ用紙（A4 版 1mm の方眼紙），電卓**を挙げておく。（１）実験ノート
本実験専用にノートを一冊各自用意する。ルーズリーフ形式は後に散逸するおそれがあるのでおすすめできない。前述したようにノートには予習のまとめ，実験中に疑問を持った事柄なども記録すること。測定で得られた数値は表にまとめるとよい。以下の事柄を実験ノートに記入すること。

- 日付，天候，室温（必要に応じて湿度，気圧）
- 目的
- 原理
- 方法
- 各測定器，装置の名称，測定系のブロック図
- 測定条件及び測定値[1]の表とグラフ（測定値については有効数字，制度，測定値のばらつきの程度と制度の比較も評価）
- 結果の解析（計算処理，グラフにプロット）
- 結果の検討・議論
- 実験中に思いついたアイディア，疑問，その他
- 装置の問題点とその改良への提案

[1]全ての値には単位を明記しておくこと。

（2）グラフ用紙
数値をグラフ化しておくと，得られた測定値などの正否を容易に判断できる。従って出来うる限り結果はグラフ化せねばならない。測定と同時に結果をグラフ化しておくと次の方針も立てやすい。**実験中に結果をグラフにする**習慣を身につけたい。
（3）電卓
測定結果を解析する場合，計算をする必要がある。各自出来れば関数電卓を用意しておくこと。最近は携帯電話で代用する人もいるが所詮は四則演算しかできない。

1.2　予習

効率よく実験を行うには予め実験の目的や原理を理解しておかなければならない。実験題目予定表をみて次の実験を確認しておくこと。

1.3　実験

必要な器具や機器を保管場所から実験場所に移動し，実験測定系を組み上げる。電気関係の実験では配線が必要となる。誤った電気配線のまま電源スイッチを入れると実験装置の故障・破損の原因となるので特に注意を要する。以下の事柄を念頭に置いて測定を行う。

1. 実験方法は用いた理論・計算式と対応しているか。
2. 実験条件を満足しているか。
3. 適切な測定装置を用いたか。
4. 測定装置を正しく使用したか。
5. 測定装置の精度はいくらか。
6. 結果の再現性は。

項目 7 は，最も重要なので各測定は**必ず複数回行う**こと。

1.4　レポート

実験終了後実験結果と考察を簡潔にまとめてレポートを提出する。下記の事項を必ず記入すること。

- 実験題目
- 実験年月日
- 実験者名と学生番号
- 共同実験者名
- 実験の目的
- 実験の原理
- 実験方法
- 実験装置の概略
- 実験結果（グラフや表にまとめる。計算結果についての説明を加える。）
- 実験結果に関する考察（ここが最も重要）
- 課題

考察を書く場合，実験の失敗原因などを論理的に述べる。次ページにレポート本文の例を示す。光電効果に関する実験を例にしている。各自実際にレポートを書く際は章立てなど多少異なることになる。次ページでは図と表が目的などよりも先に表示されてしまっている。これはあくまでも本手引き書作成上の問題であって実際のレポート作成に際してはこのようなことのないようにお願いしたい。

表 1.1: 金属の仕事関数。表の題名は表の上に書く

金属	仕事関数（eV）
Na	...
W	...

レポートの作成例

1. 目的

光は干渉・回折 ··· 以下略（簡潔に述べる）

２．理論

2.1 光電効果

金属表面 ··· 以下略（簡潔に述べる）

2.2 光の粒子性

光が波で ··· 以下省略（簡潔に述べる）

3. 実験の原理と方法

本実験では ··· 以下省略（簡潔に述べる）

実験結果と考察

図 1.1 に横軸を入射光の振動数，縦軸に電子の最高運動エネルギーを示す。図に示したようにナトリウムに光を照射した場合 5×10^{14}Hz まで電子が飛び出さない。この図から電子の運動エネルギーが振動数に比例することがわかる。しかしタングステンに光を照射した場合比例関係からのずれが見られる。この理由は，··· 以下省略

以上の結果から金属の仕事関数を求めて表 1 を作成した。この表からわかる

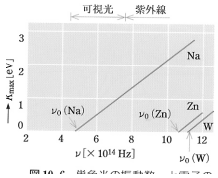


図 1.1: 単色光の振動数 ν と電子の最高運動エネルギーの関係。図の題名は図の下に入れる

ように ··· 以下略

4. 課題

テキストに与えている課題に対する回答をここに書く。

参考文献

レポート作成に当たり参考にした本などを列挙する。

第２章　基本的な測定装置測定器具の取り扱い

本章は，使用する測定器になれてもらうために予め測定器に触れてもらう機会を創るために設けている．物理実験に限らず実験科学における重要な機器について説明する。一般にアナログ機器の読みは，**最小目盛の 10 分の 1 まで読む**[1]．

2.1　長さ、質量、時間

2.1.1　長さの測定

単に長さを測定するだけなら巻き尺や金尺を使えばよい。しかし、mm 以下の精度を必要とするような場合にはノギス（バーニヤ）やマイクロメータを用いる。

ノギス

図 2.1 にノギスの外観と表示例を示す。副尺は，1mm を２０等分している。ノギスは図 2.1 に示す外径と内径測定の他深さ方向の測定を行うときに使う。数値の読み方を説明しておこう。図に右側に主尺と副尺部分の拡大図が示されている。副尺の 0 は，主尺の 12.0 と 13.0mm の間にあることから被測定物の寸法はおおよそ 12.5mm と予測される。次に副尺と主尺の目盛が一致するところを探すと副尺の 4.5 で一致している．故に 12+0.45 でこの被測定物の長さは，12.45mm である。

マイクロメータ

マイクロメータの概観を図 2.2 に示している．副尺の一回転 50 目盛は，主尺の 1 目盛 0.5mm である．すなわち，一目盛 0.5/50=0.01mm である．この図でラチェットストップというのは，空回りする機構のことである．測定の際

[1]従って，最後の桁は，目分量で読んだ値となる．

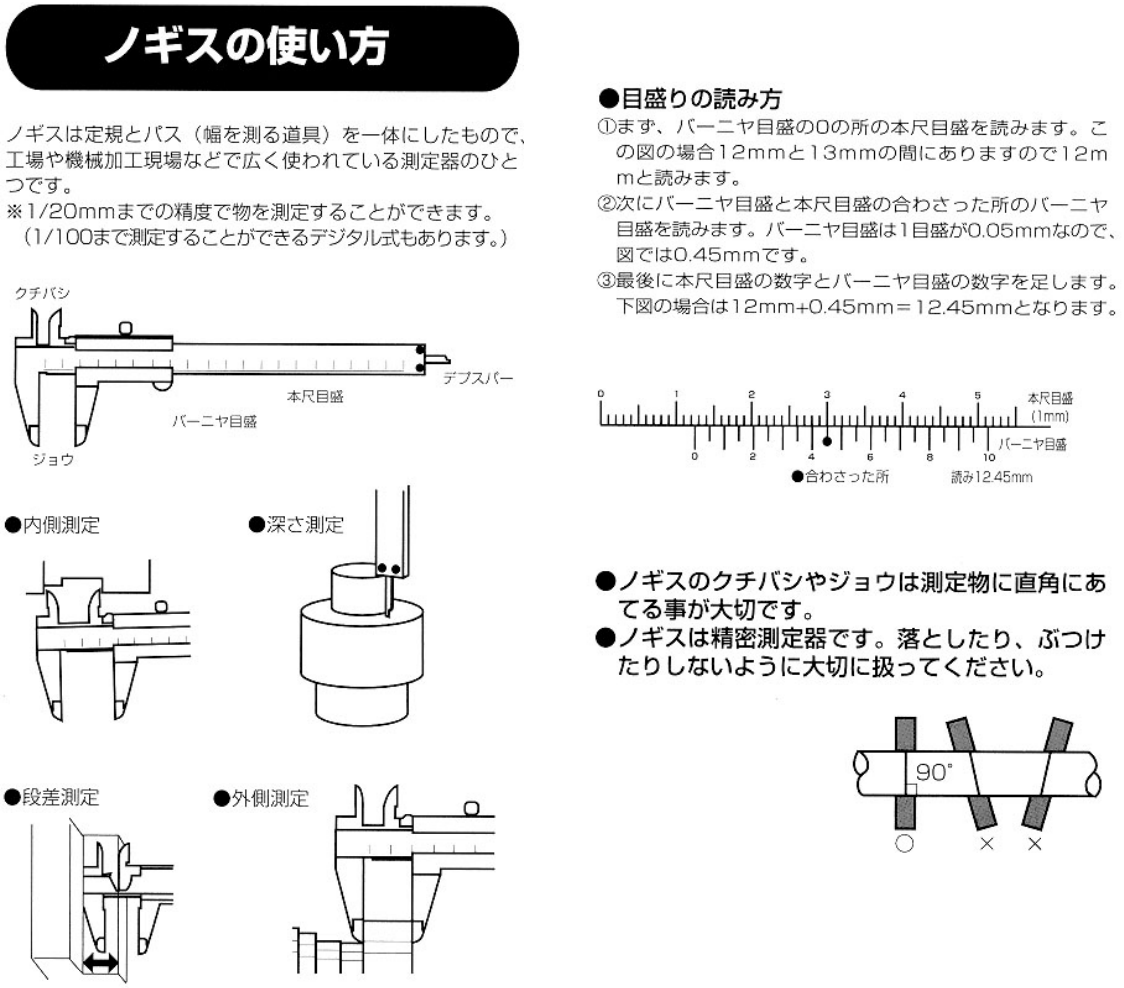


図 2.1: ノギスのの使用例

には被測定物をはさんだ状態でラチェットストップがギーギーと音を立てて空回りするまで回転させる。被測定物を取り外す場合はツマミを反時計方向に回して取り外す。測定終了後は，1mm 程度測定面を離しておくこと．図 (b) の例では，主尺の 5mm が現れており，主尺下の.5mm を表す線も現れている．また，6mm はぎりぎり現れていない．よってここから被測定物は，5.5mm 以上 6.0mm 未満である．次に副尺の目盛を読むと 49.3 程度である．最後の 3 は，目分量で読む．故に，この物体の長さは，5.5+0.493=5.993mm である．

最後に注意すべき点は，ゼロ点がずれている場合もあるということである．ゼロ点のずれも以上の説明を参考にして読み取っておき測定値にずれを加える必要がある。例えばマイクロメーターの読みを X としずれが正の側に Δs ずれていれば，測定値として $X - \Delta s$ としなければならない。逆にずれが主尺のゼロを超えていたら $X + \Delta s$ とする。マイクロメーターの実習は別途行われる。

2.1.2 質量の測定

質量は台秤を用いるかデジタル表示できる電子天秤を用いる。電子天秤は電磁石を利用している。測定皿を磁力で浮かせておき，その上に被測定物を乗せる。質量に比例して電磁石にかかる電圧が大きくなる。電磁石を構成するコイルに流れる電流を質量に換算して表示させる。上皿天秤型のものと試料皿が硝子扉の中に入ったものがある。物理学実験室に置いてあるのは後者である。電子天秤には測定できる質量の制限があるのでその都度マニュアルで確認のこと。電子天秤では，1mg まで測定可能である。以下に測定手順を記す。

1. 電源を入れる。
2. ゼロ点スイッチを押す。
3. ビーカーや薬包紙[2]などの風袋を乗せる。
4. 風袋引きスイッチを押して，表示がゼロになったことを確認する。
5. 秤量する。
6. 電源スイッチを切り，上皿を羽か刷毛を用いて掃除する。一日のうちに何度も使用する場合は電源を入れたままにしておく。

[2]特に吸湿性の高い薬品の秤量には使用しない。

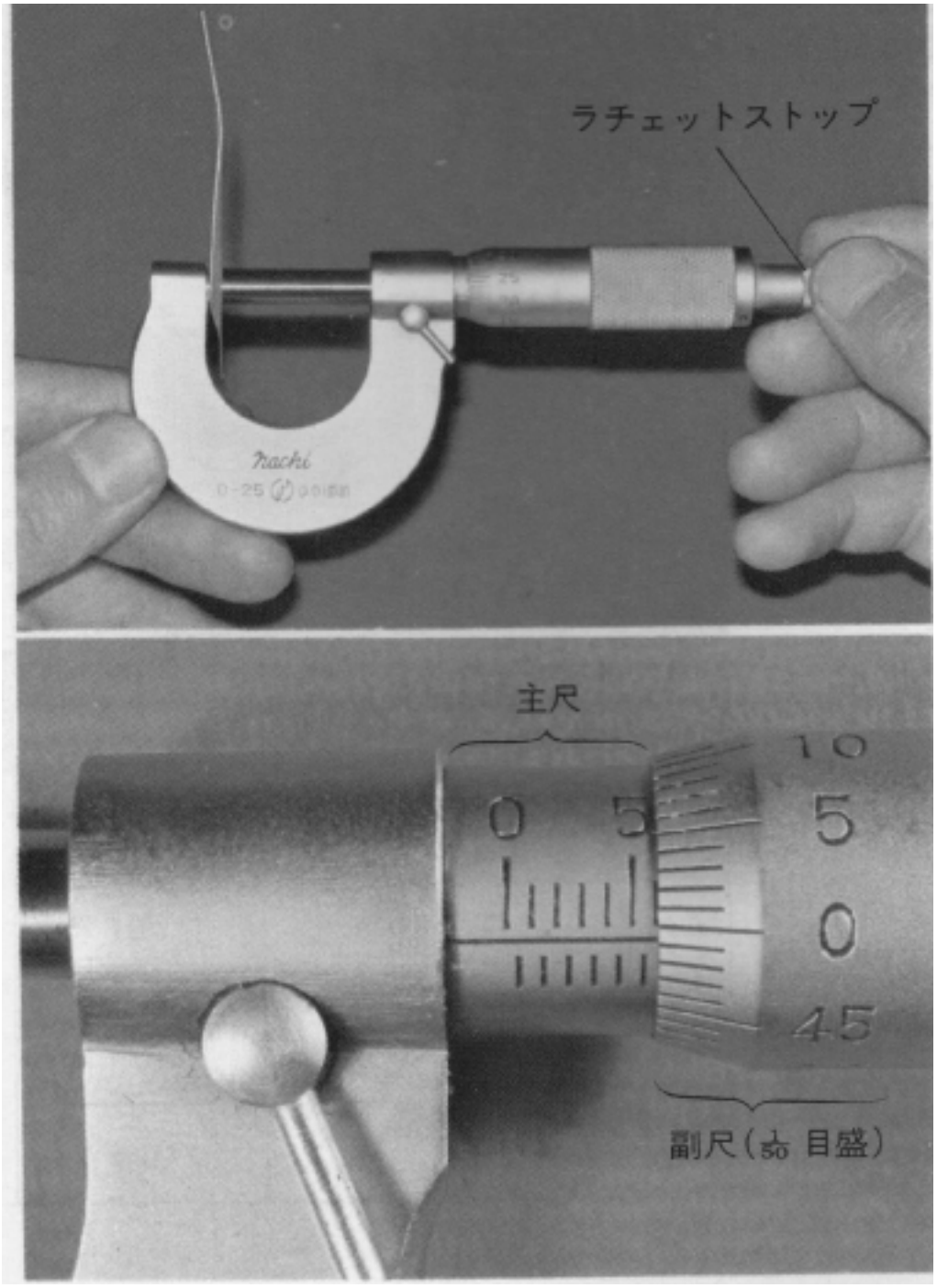


図 2.2: マイクロメータの外観

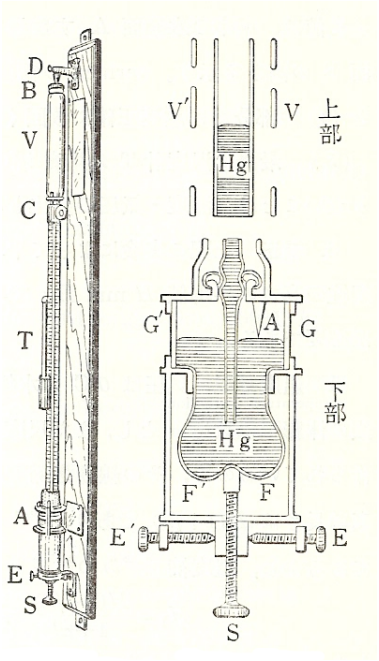


図 2.3: Fortin の気圧計。(a) 全体図、(b) 上部と下部の詳細図。

2.1.3 時間の測定

時間の測定には通常ディジタル式の水晶発振によるストップウォッチを用いる。使用方法についてはおそらく説明を要しないであろう。レーザーを用いてルビジウム Rb 等のアルカリ原子のイオンの熱運動を限りなく小さくしてイオンの準位間の遷移を利用する原始時計も実用化されつつある。原子時計は，水晶発振式の時計に比べ数桁精度がよい。

2.2 フォルタン Fortin の気圧計

Fortin の気圧計は、Torricelli の真空を使って気圧を測定する装置である。図 2.3(a) と (b) にそれぞれ装置全体と上部と下部の詳細を示す。約 1[m] のガラス管の一端を閉じて水銀を入れて水銀槽中に逆立したとき、槽中の水銀面 A より管内の水銀面 B までの高さを mmHg の単位で測定する。

1. 付属の温度計の温度 t_1°C を読む。
2. 管軸を垂直にするため、３本のねじ E を緩めて、支点 D によって気圧計が自由に懸垂した位置を保つように適当に三方から E をしめて固定する。

図 2.4: 直流安定化電源の外観

3. 槽中の水銀面が針先と一致するようねじ S をまわして、水銀入皮袋 F を上下させる。

4. ねじ C をまわして副尺 V を上下し、副尺の下端 VV' の線と管中の水銀の上端 B を一致させる。

5. 最後に温度計で t_2°C を読み取る。

2.3　電子計測機器

オシロスコープに関する実験は別途用意されているのでそれ以外の電子計測器について説明しておく。

2.3.1　直流安定化電源

簡単な実験であれば市販の乾電池で十分である。しかし乾電池には寿命も有り規格（通常 1.5V）があるので使い勝手の悪いこともある。そのようなときには直流安定化電源（以下この節では電源という）を用いる。これは電子回路を用いて交流を入力して直流に直すものである。これを用いると有る程度任意の電圧または電流値を出力出来る。詳しくは菊水電子工業のホームページ（http://www.kikusui.co.jp/knowledgeplaza/?d=powersupply1）を参照してもらうとしてここでは使い方に絞って説明する。図に上記ホームページに掲載されている電源の外観を示す。左は正面から右は裏から見た写真である。1 は、出力している電圧と電流の測定値をデジタル表示している。これはメー

カーによってはアナログ計器を用いることもある。例えばコンデンサーの充放電とセンサープロジェクトで用いている中村理科の電源ではアナログ機器を使って出力表示している。2、3は、それぞれ電圧出力と電流出力の調節つまみである。やや高級な電源では通常のオンオフに加えて（4）、更に実際に出力する際にオンオフ（5）できるようになっている。従って4を押しただけでは電圧あるいは電流は出力されない。6には、出力用の導線を接続して負荷に出力をかけられるようになっている。9は、コンセントから電源ケーブルを経て交流電源（交流 100V）を入れるところである。赤はプラス側、白はマイナス側である。

課題

導線を出力端子とつなぎなさい。シャープペンシルの芯両端をわにぐちクリップではさみなさい。出力を徐々にあげなさい。シャーペンの芯は最後どうなるか。

2.3.2 （デジタル式）テスター

テスターは簡単に電気的な特性を調べるときに用いられる。ただしここで説明するテスターの精度は高くないので高精度の測定には後述するデジタルマルチメーターを用いる。

図 2.5 にデジタルテスターを示す。液晶表示部に示される数値を測定者が読み取る。直流及び交流電圧，直流電流，抵抗及び出力を測定できるようになっている。各部の名称は，図 2.5 に示されているとおりで以下に簡単に名称を記しておく。

1. 液晶ディスプレー
2. パネル
3. データホールドボタン
4. 機能変換ボタン
5. 自動／手動変換ボタン（レンジ）
6. 共通入力ジャック
7. mA（電流）/°C 入力ジャック
8. 10A 入力ジャック（10A 以下の大電流を測定したいとき）
9. V, Ω, Hz, 容量，ダイオード入力ジャック

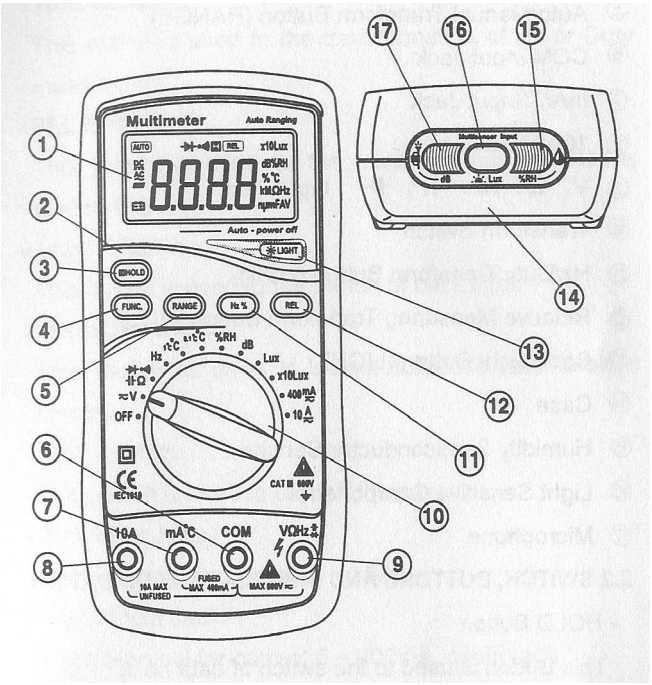


図 2.5: デジタルテスター

10. 変換スイッチ
11. Hz/Duty 変換ボタン
12.
13. バックライトボタン
14. 箱のこと
15. 湿度センサー
16. 光センサー
17. マイクロフォン

テストリードは黒と赤で被覆された一対で構成される。赤いリードと黒いリードは，それぞれテスターの 7, 8, 9, または 10 と 6 に挿入する。赤いリードと黒いリードの役割は国際的な約束事である。切替部と目盛板を絡めて以下に使用方法を説明しておこう。

抵抗の測定，電圧の測定

図 2.5 で赤いリードを 9 に接続する。黒いリードは，6 である。まず抵抗の場合，10 変換スイッチを Ω と表記されたところに回す。そして被測定抵抗を赤いリードと黒いリードの金属部で接触すると抵抗値が表示される。電圧の場合は，V と書かれたところに合わせる。電圧には直流（DC）と交流（AC）がある。このテスターでは 4 の Func ボタンを押すことで DC と AC を切り替えられる。そのとき DC または AC という表示が左端に現れる。

電流の測定

赤いリードを 7 に接続する。（本実験では大電流を流さないので 8 は無視して良い）そして 400mA と書いてあるところまで 10 を回す。そして測定したい回路素子などの両端を赤いリードと黒いリードで接触すればよい。ここでも直流と交流は電圧と同じようにすればよい。

照度の測定

まず赤と黒いリードを外す。10 のスイッチを Lux または ×Lux に合わせる。光源に対して垂直に 16 の光センサーを向ける。照度が液晶に表示される。

2.3.3 デジタルマルチメーター (DMM)

50μA 程度の電流計に抵抗と電池を切り換え接続することで，電流は，1μ〜10A，電圧は 0.01〜1000V，抵抗は，0.1Ω〜10M Ω 程度まで測定できる装置をデジタルマルチテスターという。電流計の代わりに AD(Analog to Digital) 変換器と文字表示板を用いたものをデジタルマルチメーター（以下 DMM）と呼ぶ。テスターの方はもっぱら携帯用と考えて差し支えない。DMM の電圧は，最小目盛分解能が 10μV で最大 1000V まで，電流は，10 μA の分解能で 10A まで，そして抵抗は 0.01Ω の分解能で 10MΩ まで測定できる。DMM は電圧電流のほか抵抗値，交流 AC 信号の振動数（周波数とも言う），周期なども測定できる。

例としてヒューレットパッカード社（現 Agilent 社）製 DMM の正面から見た図 2.6 を示す。電池の両極や抵抗などの両端に触れる探針（プローブ）から DMM に信号を入力する。プローブを表面右端の　と表記された個所に接続する。通常プローブは赤と黒のリード線がつけられている。黒を LO と表記されたところに接続する。もう一方の赤線は，電圧と抵抗測定時に上の HI と表記されたところに，電流測定時には LO の下にある I と書かれた所に接続する。電流と電圧でプローブを測定する個所が違うのでよく注意すること。電源は，Power と表記されていて押すと on である。電源をオンしてからメッ

セージがいくつか表示され暫くたつと直流電圧 (DC V) を測定できる状態になる。DC(Direct Current)，AC(Alternative Current) は，それぞれ直流と交流を表す。例えば，電気抵抗を測定したい場合は，Ω 2W のボタンを押せばよい。すなわち測りたい量によって対応するボタンを押せばよい (図１の部分)。ボタンの上にブルーの表示がある（DC I, AC I, Ω 4W, Period, ダイオードの記号)。この表示の機能を使うためには，右下のブルーのボタン（Shift キー）を押してから対応するボタンを押すと切り替わる。

2.4　基本的な測定器に関する実習

2.4.1　ノギス，マイクロメーター

ノギスを使って友人と好きなものを選んで同一の物体を測定し，お互いの測定値を比較せよ。

- 手持ちの硬貨の厚さをノギスとマイクロメータを用いて比較せよ。
- 管の内径を測定してみよ。

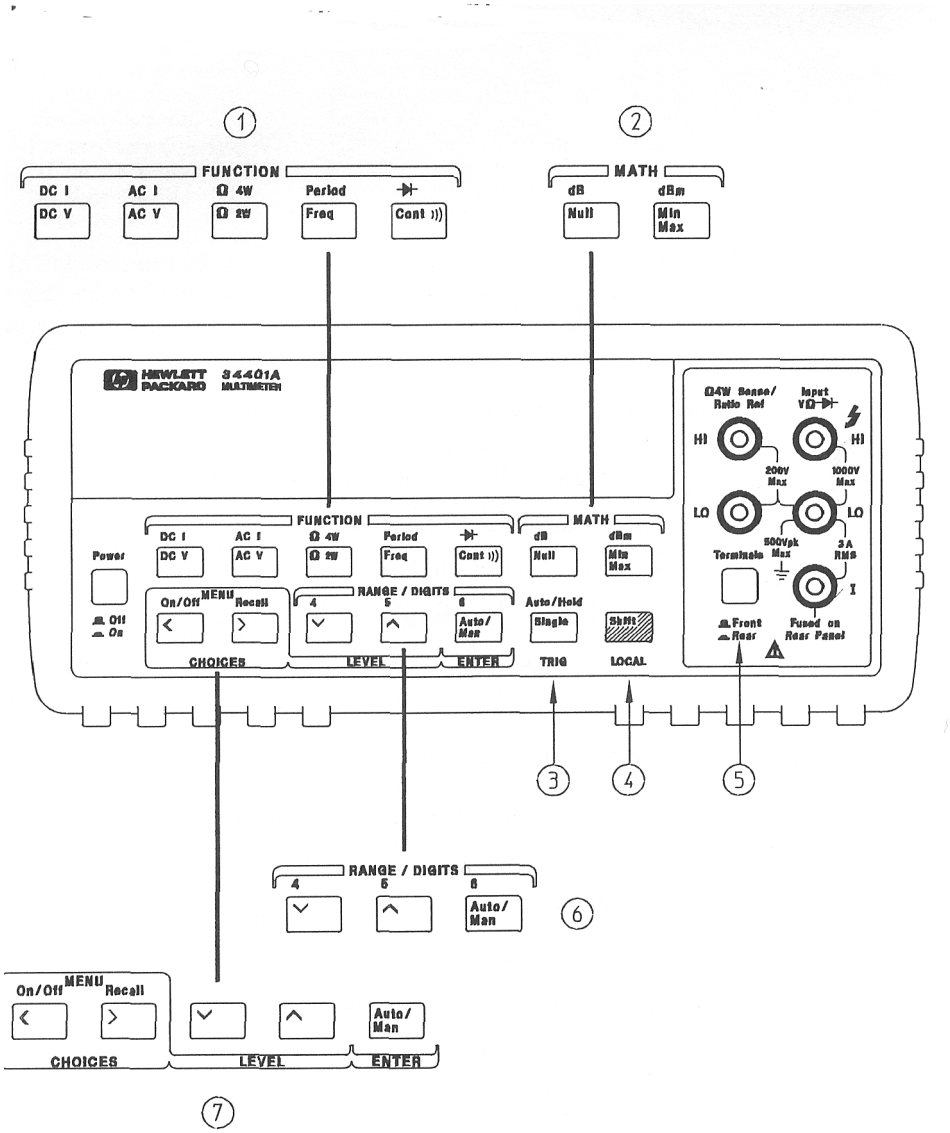
2.4.2　テスター

- 乾電池の電圧を測定してみよ。（直流電圧）
- 商用電源の電圧を測定せよ。（交流電圧）
- 右手と左手の間の抵抗を測定せよ。（50kΩ ∼1MΩ）

2.4.3　総合課題

次の時間に行う計算機実習に用いる課題 3.6.1 に対する測定すべき量を以下に列挙する。シャープペンシルの芯を５本（同一メーカー、同一種（例えば HB とか)）用意すること。それぞれ例えば A, B, C, D, E とする。

1. ノギスを使って長さを A から E についてそれぞれ５回測り、記録する。
2. マイクロメーターを使って A から E の直径を三カ所（両端、中央）測定する。各場所について５回測定する。１で測った長さのデータと対応をとれる様に注意して測定すること。
3. A から E まで両端の電気抵抗を測定する。測定値は安定しないので適当に読み取ればよい。これも５回測定を行う。



1 Measurement Function keys
2 Math Operation keys
3 Single Trigger / Autotrigger / Reading Hold key
4 Shift / Local key
5 Front / Rear Input Terminal Switch
6 Range / Number of Digits Displayed keys
7 Menu Operation keys

図 2.6: DMM の正面

4. それぞれ A から E までの長さ、直径、抵抗値の平均値を算出し、電気抵抗率の平均値、標準偏差を求める。

第3章　実験データの処理

本章では，実験で得られるデータの誤差と処理について簡単に述べる．

3.1　測定の種類

測定には，３種類ある．

(1) **直接測定法**
求めたい量を適当な単位を使って数字の部分を読みとるように工夫した機器を使って直接観測して決定する場合を直接測定という．

(2) **間接測定法**
求めたい量を関係の知られている他の量を直接測定し，その結果から計算して求める場合を言う．

(3) 条件付測定
測定する量の間に厳密な数学的関係のある場合の測定を言う．

3.2　グラフ

いくつかの物理量（測定量と考えてよい）間の関係を見やすく示すためにグラフを使う。物理法則は、物理量間の関係を定量的に示していることが多い。通常変化させた物理量を x 軸、変化した物理量（測定される量）を y 軸にとる。

グラフを書くときは、[1]

1. 図の題名（**必ず図の下**に入れる。）
2. 必ず縦軸と横軸を入れる。グラフ用紙の罫線はあくまで図を書きやすくするためのものであって，自分で縦軸と横軸を入れる。
2. 入れた縦軸、横軸に物理量と単位を書き込む。
3. 軸の目盛りと数値入れる。

を守らなくてはならない。グラフの中に測定した値を対応するところに印をつけることをプロットするという。印には、○、●、□等を用いる。

[1]特に手書きする場合を念頭に置いている。

3.2.1　グラフの種類

本実験では、方眼紙（線形グラフ）、片対数グラフ、両対数グラフに測定値をプロットする。方眼紙にプロットする場合の説明は省略する。片対数、または両対数は、測定した値の桁数が大幅に変わる現象に対して使われる。図１－１では、log(x) の例を示す。この場合、０は原点とはならない。今３種類の関数

$$y = ax + b$$
$$y = c\exp(-dx)$$
$$y = kx^m$$

のグラフを上に上げた３種類のグラフ用紙に対して書いておく。

3.3　測定の誤差

3.3.1　誤差

測定値は，様々な原因により不確かさを常に持っている．この不確かさを表すのに**誤差**(error) を使う．測定値を X，真値を x とすると誤差は，

$$\epsilon = X - x \tag{3.1}$$

で与えられる．一般に測定の精度は，誤差率 $\frac{X-x}{x} \times 100[\%]$ で表す．誤差率の小さな実験ほど精度の高い実験と言うことになる．

真値は，いかなる方法いかなる実験でも得られないので，多くの測定結果の平均値や最小自乗法（後述）によって真値に最も近いと思われる最確値を得て真値の代用とする．

3.3.2　誤差の種類

誤差は，測定において避けられないものである．しかしながら，**校正**（calibration：計測器の補正を求めること.）や**補正**（correction：真値に近い値を求めるため，測定値あるいは計算値にある演算を施すこと.）で有る程度抑制可能である．誤差は，系統誤差と偶然誤差に分かれる．

1. 系統誤差：これは，特定できる原因により起こり，補正可能である．更に，以下のような誤差がある．

   1a. 理論誤差：理論的に誤差の大きさを算出して除去できる誤差である．

   1b. 器械誤差：計器そのものの誤差で校正試験を用いて補正可能である．

1c. 個人的誤差：測定者の癖で起こる誤差．測定者を増やすとか測定者を訓練することで除去できる．

1d. 過失誤差：測定者の不注意で起こる誤差．

2. 偶然誤差：系統誤差を取り除いても残る誤差である．この誤差は，原因を特定できないので補正・校正でも除去できない．この誤差は，統計的処理の対象となり，最小自乗法は偶然誤差を除去する目的で行われる．

3.4 偶然誤差の取り扱い

3.4.1 偶然誤差

算術平均の原理 直接測定の場合に信用の程度の同じ測定を繰り返して真の値に最も近いと考えられる値を出すには観測値の算術平均を取ればよい．

公理１ 数多くの観測がある場合には同じ大きさの正負の誤差は同程度に起こる傾向がある．

公理２ 絶対値の小さな誤差は，絶対値の大きな誤差より多く起こる傾向がある．

公理３ 一つの測定において誤差は正負同じ大きさのある限界内にあってこれより値の大きな誤差は起こらない．

3.4.2 偶然誤差の取り扱い

今我々は，系統的誤差を取り除いたと仮定する．測定値 $x_1, x_2, ..., x_N$ は，偶然誤差しか含まない．これらの測定値は，Gauss の誤差関数（正規分布関数）と呼ばれる

$$f(x) = \frac{exp[-(x-X)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

分布関数で表される母集団から任意に抽出された標本値であるものと見なす．σ は，標準偏差である．上式は，前節に取り上げた公理を前提としている．このとき x が平均値

$$\overline{x} = \frac{x_1 + ... + x_N}{N}$$

に等しいとき x が真値 X である確率が最も高い．

標準偏差 σ は，N が十分大きいとき

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{N}(x_i - X)^2/N$$

で与えられる．しかし，真値 X が不明でデータ点数 N も有限の場合，次式で定義される標本標準偏差

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - x)^2}{N-1} \tag{3.2}$$

を用いる．

標本標準偏差は，個々の測定値のばらつきを示す標準偏差である．N 回の測定値の平均 $\overline{x}$ には，次の標準偏差 s_m がついている．s_m は，平均２乗誤差または平均誤差と呼ばれる：

$$s_m = \frac{s}{N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - x)^2}{N(N-1)}}$$

s_m を使って，測定値と誤差の範囲を

$$\overline{x} \pm s_m \tag{3.3}$$

のように表す.

3.5　実験データの処理

3.5.1　有効数字と数値計算

1[%] の誤差を持っている，例えば電流計の値が 2.45［A］であった場合，真の電流値は，$2.445 \leq I \leq 2.454$[A] であることを意味する．３桁目の５には，誤差が含まれている．しかし，意味がある．このように測定値を表す数値の中で意味のある数字を**有効数字**といい，誤差を含む最後の桁までが有効数字の桁数となる．いまの例で言うと有効数字は３桁である．

有効数字を明確にするため 0.0025 と言う読みを 2.5×10^{-3} と表すこともある．

有効数字の桁数は，測定器具によって定まる．よって，あまり多くの桁数まで計算するのは無意味といえる．計算する際は，最も有効数字の桁数の小さい数値を規準としてその桁数より一桁多くとりその数字を四捨五入または丸める．丸めるとは，最後の桁が奇数の時切り捨て，偶数の時切り上げる操作を言う．間接測定においては，測定値の有効数字の桁数が等しいことが望ましい.

3.5.2　補正

誤差の含まれる測定値の誤差がわかっている場合，ある値を測定値に加える操作を補正という．補正を c とすると

$$a = x - X = -\epsilon \tag{3.4}$$

で表される．補正百分率は，$\frac{x-X}{X}\times 100[\%]$ で与えられる．補正率 δ は，$\delta = \frac{x-X}{X}$ である．真値は，

$$x = X(1+\delta) \tag{3.5}$$

である．
例えば，電気抵抗 R を求める場合，電流計・電圧計の測定値をそれぞれ I_m，E_m，また，補正率を δ_i, δ_e とすると，

$$R = \frac{E_m(1+\delta_e)}{I_m(1+\delta_i)} = \frac{E_m}{I_m}(1+\delta_e-\delta_i) \tag{3.6}$$

で求められる．

3.5.3 測定結果の表現法

実験結果は，必ず物理的に意味のあるように整理しておかなければならない．理論式の知られている場合には測定データと理論式からもとめられる数値をグラフ上に同時に描いてやればよい．ここでは理論式のない場合について述べる．

3.5.4 実験式と実験曲線

校正した測定値を用いて正確に測定し，必要に応じて測定値に補正を施したとする．こうして得られた測定値は，温度を変えて測定したりとか様々なパラメータを変えて測定したのが一般的である．実験曲線を描くに際して実測値を通る曲線を引くと不要な凹凸を作ってしまう．これでは誤った解釈に導かれてしまう．実験曲線を引くときには全体を見渡して平均の位置で滑らかに描く．そのとき得られた測定値を適当な代数式（実験式）で表現する必要がある．その際には，最小２乗の原理を使って求める．実験式は，以下のように分類される：

1. 直線　$y = ax + b$（a, b：定数（以下同様））
2. 放物線　$y = ax^b$
3. 指数関数　$y = a\exp(bx)$
4. 調和関数　$y = a_0 + a_1\cos x + a_2\cos 2x + ... + b_1\sin x + b_2\sin 2x + ...$

3.5.5　最小自乗法

実験で得られたデータの組 $(x_i, y_i)(i = 1, \ldots, n)$ を考える．このデータの組が直線 $y = ax + b$ で与えられるとき，実験データと直線との誤差を最小にするには，２乗誤差を ε と書いて

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n} (y_i - ax_i - b)^2 \tag{3.7}$$

を最小にしてやればよい．その条件は,

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = 0$$

である．$\partial\varepsilon/\partial a = 0$ から

$$a \sum_{i=1}^{n} x_i^2 + b \sum_{i=1}^{n} x_i - \sum_{i=1}^{n} x_i y_i = 0 \tag{3.8}$$

を得る．同じく $\partial\varepsilon/\partial b = 0$ からは

$$bn + a \sum_{i=1}^{n} x_i - b \sum_{i=1}^{n} y_i = 0 \tag{3.9}$$

を得る．この２つの条件 (式 3.8，3.9）から

$$a = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i y_i & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} y_i & n \end{vmatrix}}{\Delta} \tag{3.10}$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} y_i \end{vmatrix}}{\Delta} \tag{3.11}$$

が得られる．ここに,

$$\Delta \equiv \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & n \end{vmatrix} \tag{3.12}$$

である．この方法は，データ点数３以上に対して適応される．

同様にして二次関数 $y = a_0x^2 + a_1x + a_2$ が適切な場合は,

$$
\begin{aligned}
a_0 &= \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \end{vmatrix}}{\Delta}, \\
a_1 &= \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{vmatrix}}{\Delta}, \\
a_2 &= \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{vmatrix}}{\Delta}, \\
\Delta &= \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{vmatrix}.
\end{aligned}
\tag{3.13}
$$

により求められる.

3.6 課題

3.6.1 計算機の利用

前章 2.4.3 で測定した長さと直径及び断面積を表にしてその平均値を算出して提出しなさい。シャープペンシルの芯の抵抗率を求めて報告しなさい。抵抗率 ρ[Ωm] は，芯の長さ L[m]，芯の断面積 S[m^2]，及び抵抗 R[Ω] を使って

$$\rho = R\frac{S}{L}$$

で与えられる。

第４章　安全の手引き

本章では一般の物理学実験を実施する上で注意すべき安全上の項目について述べる。「物理学実験 A, B」ではこの中の一部の注意事項を参照することになる。更に詳しいことを知りたければ，例えば日本化学会編「実験化学講座　基礎編 II 物理化学　上」第５版（２００３年，丸善，東京）の第８章を読みなさい。本実験では，中井浩二「実験の作法と安全」（２００８年，吉岡書店，京都）をテキストとして用いる。

4.1　薬品の取り扱い

物理関係の実験でも有機物薬品，酸やアルカリを用いる。このような場合以下のような注意が必要である。

1. 薬品の蒸発物を吸引することは有害である。ドラフトチャンバーの排気ファンは必ずまわす。実験室の窓に換気扇がついていればそれもまわす。

2. 薬品はドラフトチャンバー内で取り扱う。ドラフトチャンバー外に持ち出さない。[1]

3. エチレンやビニールの手袋を着用する。ビニールは有機溶媒に弱いのでエチレン製の手袋を利用する。実験用の着衣を使用する。[2]手袋を着用していても薬品は極力こぼさないように注意する。

[1]例外は，試料を外気から保護するための少量のアルコールなど。
[2]物理学実験 AB では不要。

4. 薬品が目に入らないよう防護ゴーグルを着用する。

5. フッ化水素酸（HF）の腐食力は，極めて強く危険である。特に注意すること。誤って皮膚に付着したり目に入った場合次のような処置を直ちに執ること。

    - 皮膚に付着したら大量の水で酸が完全に取れるまで洗って，マグネシウム乳液（酸化マグネシウムとグリセリンの混合物）を患部に塗布する。多量の HF が付いた場合はこの処置後直ちに医師の処置をうけること。
    - 目に入った場合，直ちに冷水で洗眼する。最低 15-30 分洗眼し，その後医師の処置を受けること。
    - 飲み込んだ場合，大量の水，或いは牛乳を繰り返し飲む。管理者は，必要に応じて興奮剤や人工呼吸を実施し，速やかに医師の処置を受けさせる。

4.2 高圧ボンベ

高圧ボンベと減圧弁は，取り扱いを誤ると危険である。以下に注意点を列挙する。

1. ボンベ内の圧力は，最大 150 気圧である。破裂すると人命に関わる事故になる。転倒させたり機械的衝撃を与えないようにする。また直射日光や電気炉の近くを避ける。腐食性化学薬品にも触れさせない。

2. 使用するガスとボンベの中身が一致していることを確認する。表 4.1 を参照のこと。

3. 必ず減圧弁を取り付ける。可燃性ガスと非可燃性ガスではネジの切り方が異なっているので必ず用途にあった弁を使用する。

4. 実験中異常を感じたら元栓を閉じて室内にいる全員に注意述べ室外に退避する。責任者にその旨伝えること。

高圧ガスボンベと減圧弁の取り扱いについては必要に応じて別途説明する。

4.3 強力な磁石の取り扱い

磁石を使った実験は，気軽に実施できる。なるべく磁石の効果を劇的に見せるためにより強力な磁場を作るネオジウム磁石を簡単に入手できるようになった。ネオジウム磁石は，協力であるが故に怪我や機械の故障等に注意しなければならない。例えば，磁石を取り扱う業者のホームページ

表 4.1: 代表的なガスとボンベの色

ガスの種類	ボンベの色
水素	赤
酸素	黒
不活性ガス（Ar, He, N_2）	灰色
炭酸ガス	緑
アンモニア	白
塩素	黄色

http://www.magfine.co.jp/magnetjapan/user_data/magnet_att.php
に取り扱い上の注意を述べているので参照すること。大まかな点を（許可は得てないが）転載しておく。

1. 心臓ペースメーカーなど医療機器を身につけている人は使用しない。
2. 磁石同士，磁石と表面の滑らかな鉄など磁性をもつ金属とを接触又は近づける場合，指や皮膚を挟み込んで怪我をするおそれがある。
3. 機械式腕時計は，磁化により故障の原因になる。

ここに述べた事項は，磁石に限らず強力な電磁石を用いる MRI[3]やホール効果の実験でも同じ注意が適用される。

4.4　高温（電気炉）を取り扱うときの注意点

電気炉では数 A から数十 A の電流を抵抗体に流して高温を得ている。ここで考えられる事故対策は，感電と火傷である。

1. 電線が金属製のカバーに接触していないことを確認。
2. 端子がゆるんでいないことを確認。
3. 高温を維持している間も電気炉の観察を怠らない。
4. 急激な冷却は避ける。

[3]MRI は，Magnetic Resonance Imaging の略である。Nuclear Magnetic Resonance を用いて画像に変換する医療機器である。Nuclear=原子核と原子力や原子爆弾を同一のものと誤解する人が多数いるので医療分野では MRI という名称が付けられている。

4.5 液体窒素取り扱いに関する注意点

4.5.1 液体窒素の性質

1. 液体窒素の沸点は，77.3K=-196C と日常生活では経験し得ない低温である．したがって，凍傷にならないように取り扱いには注意を要する．
2. 液体から気体に気化することでその体積が 700 倍になる．例えば 1 リットルの液体窒素は，0.7m^3 に膨張する．密閉した容器に液体窒素を入れてはならない．
3. 液体窒素の沸点は，酸素の液化する温度（90.1K）より低いので空気中の酸素を液化してしまう．よって，密閉した部屋の中では酸素欠乏を起こす危険性がある．液体窒素中に，液体酸素が多く含まれることも考えられ，材料が燃えやすくなっている可能性もある．
4. 酸欠状態になっても通常気付かないことも十分頭に入れておくこと．

4.5.2 液体窒素取り扱いに関する注意点

1. 液体窒素ならびに液体窒素を使って冷却したい物質に十分注意を払う．
2. 皮膚に触れている衣服に液体窒素が溜まらないようにする．
3. 安全めがねやマスクを必要に応じて身に付ける．
4. 液体窒素で冷却された物体を触るときは必ず**皮手袋を着用する**．皮手袋は容易に脱げるような物を使う．
5. 液体窒素を入れてよい容器以外には液体窒素を注がない．
6. 換気扇のある部屋で液体窒素を使用する．密閉された小部屋では液体窒素を使用しない．また，床に撒いたりしない．
7. 液体窒素を長時間カバーの無い容器に入れておかない．上で述べたように酸素を液化させてしまうからである．

4.5.3 救急処置

もし液体窒素を使った実験中に誰かの様子がおかしい（意識を失っている，動作がのろい等）場合，直ぐ換気の良い部屋に移す．呼吸が停止している場合，人工呼吸などを行う．同時に医者を呼ぶ．

凍傷にかかった場合，すばやく体温 (37°C) 程度で患部を温める．また，ぬるいお湯（42°C，44°C を越えてはならない）で患部を温める．ここでもこれらの作業と同時に医者に連絡する．

4.6　光

4.6.1　レーザー

第１５章では，レーザーポインター用いた光の回折実験を行う。可視光と近赤外光は，網膜上に集光されて視覚細胞の損傷を招く。紫外光は，角膜を痛める。物理学実験で使用しているレーザーポインターは，赤（660nm）と緑（532nm）で，クラス１またはクラス２に分類される。この分類は，レーザー光の強度による。特に，光に関して眼科医から何らかの注意を受けている人は，実験時に保護ゴーグルを着用してもらいたい。その折は担当者に申し出ること。

上記の説明から明らかなことを含めてべからず集を列挙する。

1. レーザー光を直接，人（自分も含めて）に向けない。気付かずに点灯している場合もあるのでレーザーポインターを手に持って振り回したりしてはいけない。
2. よく反射する物体（鏡，金属，ガラスなど）に反射させない。また，反射させた光を凝視してはならない。

研究室に配属されて卒業研究などでレーザーを使う場合は，クラス３とクラス４のレーザーとなる。これらは，通常固定されている。しかし，これらのクラスのレーザーは，レーザーポインターとことなり，いかなる場合でも目に障害をもたらす可能性がある。そのため，必ず保護ゴーグルを着用してレーザーを利用することになる。

4.6.2　紫外線，放射線

本実験で使用することはない。しかし，一般的諸注意として深紫外光，例えば 280nm 程度，の光は，DNA を損傷する。放射線，我々の場合では X 線，を扱う場合は，フィルムバッチという検出器を着用しなければならない。このフィルムバッチは，検査機関でチェックを受ける。もし被爆していれば被爆量によっては医療機関で診断を受けなければならない。そのためフィルムバッチを使用する以前に，所属機関に届けを出し，血液検査などを行って異常のないことを確認の上フィルムバッチを着用して実験を認められる。

詳しい情報を必要とする人は，本学主催の安全講習会に参加してもらいたい。

4.7　その他当たり前のこと

本実験では，殆ど危険はないと言える。いくつか当たり前なのに守ってもらえないことを書いておく。担当者の注意を無視する場合は，物理学実験の受講を拒否する。

1. 物理学実験では一年を通して，素足及び草履履きを禁ずる。下駄やハイヒールは，言うまでもなく禁止。
2. 露出の多い服装禁止。物理学実験は，ファッションを楽しむ場ではない。
3. 実験室での飲み食い禁止。
4. ホットプレートなど加熱するための器具の近くに可燃物を置かない。
5. 濡れた手で電気機器に触れない。

4.8 事故への対応

日本化学会編「実験化学講座　基礎編 II 物理化学　上」第５版（２００３年，丸善，東京）の第８章から発生しやすい事故への対応を表現を簡素に変更して転載する。人身事故が起きた場合，

表 4.2: 事故とその手当

事故	手当
軽度の火傷	流水または冷水で最低３０分以上冷やす。 消毒して傷用軟膏をつける。 滅菌ガーゼで覆う。（水ぶくれはつぶさない）
中度以上の火傷	医療機関で診察を受ける。
酸・アルカリの付着	流水で１５～２０分薬品を洗い流す。 薬品の付着した衣類は，その部分をはさみで切り取る。 痛みが強い場合抗ヒスタミン軟膏を付ける。 受傷部にガーゼかタオルをあて，氷のうで冷やす。
すり傷・切り傷	傷口の汚れを水できれいに洗い流す。 止血し，傷口をガーゼかタオルで押さえて，心臓の高さより高くする。 消毒して傷用軟膏を塗り，滅菌ガーゼで覆う。
ガラス傷	ガラス小片が皮下へ埋め込まれている可能性があるので傷部を軽く押して確認する。 その他すり傷切り傷に準じた対応をする。
薬品が目に入った時	擦らず，きれいな流水で十分目を洗う。又は，洗面器に水をはり顔を漬けて 瞬きを繰り返す。出来るだけ早く眼科を受診する。
薬品を飲み込んだ時	水か牛乳を飲ませて薄め，指を使って吐かせる。
有毒ガスを吸入した時	直ちに新鮮な空気の場所に移し，衣服をゆるめ暖かくして静かに休ませる。呼吸機能の低下が見られたら人工呼吸を施す。

1. 事後現場に複数の人間がいる場合，一人は応急措置を行い，もう一人は保健室（大学なら保健管理センター）や救急隊に連絡する。
2. 事後現場に一人しかいない場合，応急措置を行いつつ大声で近くの人を呼ぶ。
3. 事故に対する適切な応急措置を行う。

のような対応を行うこと。

第５章　統計実験

第２章で説明したとおり測定には必ず誤差が伴い，正規分布になる。本実験では測定結果の統計処理を身につけるためビー玉の直径をマイクロメータで 測定する。また，ここではデータの整理をマイクロソフトエクセルを使用してその操作方法を身につける。
使用するもの。
ビー玉３００個，マイクロメーター

5.1　実験手順

マイクロメータを使ってビー玉３００個の直径を調べる。生産されたビー玉は工業製品ではあるが基準となる直径からずれている。
方法

1. マイクロメータのゼロ点を１０回測定し，その平均を q_{01} と書く。
2. １５０個のビー玉の直径を q_i（i=1, 2, , ..., 150）をマイクロメータで測定する。ビー玉はいびつな形をしているがそれを無視してビー玉一個につき一回直径を測定すればよい。
3. マイクロメータのゼロ点を１０回測定し，その平均を q_{02} とする。
4. 残り 150 個のビー玉の直径 q_i（i=151, 152, ..., 300）を 2. と同様に測定する。
5. マイクロメータのゼロ点を１０回測定しその平均を q_{03} とする。
6. ゼロ点の平均値 q_{01}, q_{02}, q_{03} の平均をマイクロメータのゼロ点として測定値 q_i を補正する。
7. 直径の測定値 q_i（i=1, 2, ..., 300）を１０個ずつの３０個のグループに分け，表１の形に整理する。各グループごとの平均値 q_{N0}(N=1,2,...,30) を計算する。

8. 全体の度数分布表（表２参照）を作り，規格化された度数分布グラフ（ヒストグラム）を書く。但し表２において各領域の幅は，0.050mm とする。

9. 全体の平均値 q_0，標準偏差，公算誤差を求めなさい。

10. 8. で求めた分布と正規分布との一致状況を考察しなさい。正規分布曲線に 9 で求めた標準偏差と平均値を代入して正規分布曲線を書いて測定結果と比較する。

11. 7. で求めたグループごとの平均値 q_{N0}（N=1, 2, ..., 30）の平均値，標準偏差，公算誤差を求め，9. で求めた値との関係を考察せよ。

12. q_{N0} のヒストグラムを描き，正規分布曲線との関係を考察せよ。（同一グラフ上に書いて比較しなさい。）

13. q_{N0} の平均値を q_{00}，公算誤差を r_a と書いて

$$q_{00} - r_a < q_i < q_{00} + r_a$$

の範囲に q_{N0} の５０％が入っているかを確かめよ。

14. 今回の測定値分布についてその他の分布と比較・考察しなさい。

表1　直径の測定値

N	1		2		・・・	30	
	i	q_i	i	q_i	・・・	i	q_i
データ	1		11			291	
	2		12			292	
	3		13			293	
	4		14			294	
	5		15			295	
	6		16			296	
	7		17			297	
	8		18			298	
	9		19			299	
	10		20			300	
q_{N0}							

表2　度数分布表

Diameter(mm)	頻度	Diameter(m	頻度	・・・
~		~		
~		~		
~		~		
~		~		
~		~		
~		~		
~		~		
~		~		
~		~		
~		~		

5.2　付録

本実験で必要な公式を記しておく。必ず**吉川泰三編「改訂新版物理学実験」学術図書出版 3-33 ページ**に目を通しておくこと。

多数の測定をした結果は，規格化頻度分布として表現される。x について n 回の測定の場合以下のように表現される。（図を参照しなさい。）
離散分布：$f_n(x_i)$ は，$x = x_i$ での確率，或いは
ヒストグラム：$(x_i - x_{i-1})f_n(x_i)$ は，$x_{i-1} < x \leq x_i$ における確率，或いは
連続分布：$\int_{x_\alpha}^{x_\beta} F_n(x)dx$ は，$x_\alpha < x \leq x_\beta$ における確率。
規格化条件は，

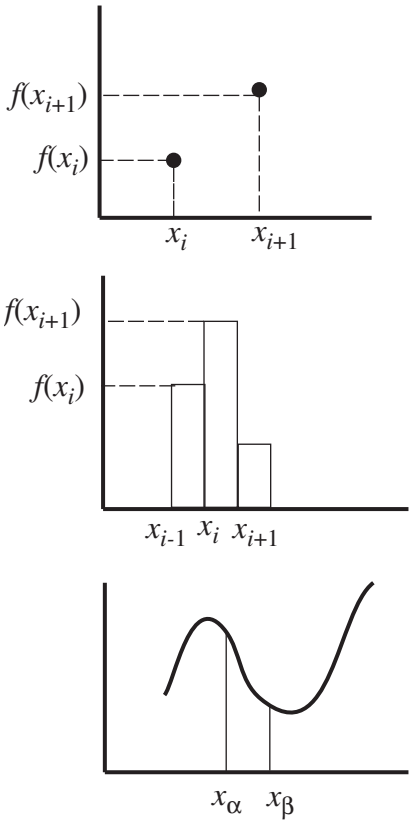


図 5.1: 分布の例. 離散分布，ヒストグラム，連続分布を表す。

$$\sum f_n(x_i) = \sum (x_i - x_{i-1}) f_n(x_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_n(x) dx = 1$$

である。

5.2.1　誤差の処理

平均二乗偏差（または**標準偏差**）σ は，各測定値の誤差 ϵ_i（i=1, 2, ..., n）を使うと

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \epsilon_i^2}{n}} \tag{5.1}$$

で与えられる。ここで誤差 ϵ_i は，真値 X と測定値 x_i の差で与えられる：

$$\epsilon_i = x_i - X. \tag{5.2}$$

真値は，平均値 M で代用される。平均値からと測定値の残差を v_i（$=x_i - M$）とかく。そのとき

$$\frac{\sum v_i^2}{n-1} = \frac{\sum \epsilon_i^2}{n} \tag{5.3}$$

が成立する。よって平均二乗偏差は,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \tag{5.4}$$

で与えられる。平均値に含まれる誤差は n を増やすと $1/\sqrt{n}$ に比例して減少するので**平均値の二乗平均誤差**σ_0 を

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \tag{5.5}$$

と定義される。
公算誤差r は,

$$r = 0.6745\sqrt{\frac{\sum_i \epsilon_i}{n}} \tag{5.6}$$

である。

5.2.2 誤差の分布

おのおの $\pm e$ の誤差がある場合，最終的に n 回の測定の後 $\epsilon = me$ になる確率は,

$$\frac{n!}{2^{-n}\left[\frac{m+n}{2}\right]!\left[\frac{n-m}{2}\right]!} \tag{5.7}$$

で与えられる。これは二項分布と呼ばれる。この極限は，Gauss 分布（または正規分布）であり

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{5.8}$$

で与えられる。これは，測定値が x と $x+dx$ の間に見いだされる確率である。ここで X は，真値である。その他ポアソン (Poisson) 分布

$$\frac{e^{-\mu}\mu^r}{r!} \tag{5.9}$$

もある。

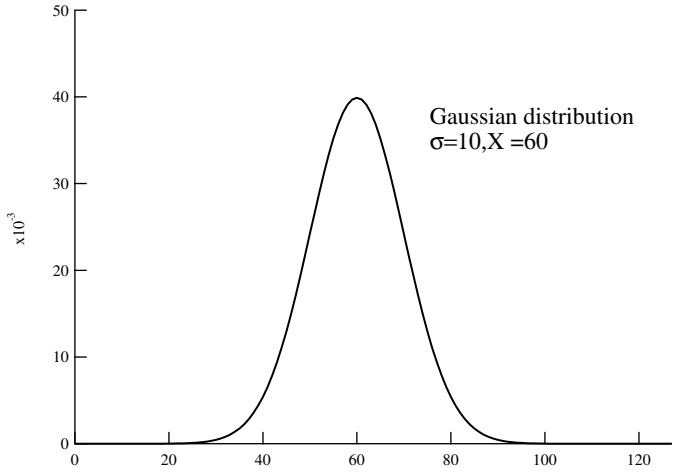


図 5.2: ガウス分布。平均値 60 標準偏差 10

第6章　気体分子運動のモデル実験

ある場所を出発した分子が他の分子と衝突しながら拡がっていく様子を方眼紙上でモデル実験を行う。

6.1　理論

気体の拡散

6.2　実験方法

用意するもの：さいころ，方眼紙

1. 一人目（以下 A）がさいころを連続してふり，二人目（以下 B）はその数字を見て次の約束に従って方眼紙に矢印を記入する。
2. 1 の目が出たときは x 軸正の方向に 1 目盛り（1cm），2 の目なら y 軸正の方向に 1 目盛り (1cm），3 の目なら x 軸負の向きに 1 目盛り，そして 4 の目なら y 軸負の向きに 1 目盛り矢印を書き加えていく。この 1 目盛りが分子の**平均自由行路**に相当する。5,6 の目は無視し 1 から 4 の目の出現した回数が 50 回になるまでさいころを振り続ける。
3. 50 回目の位置（A の終点）が求まったら，つぎから B がサイコロを振り A が矢印を記入して B の終点を求める。
4. 次に 5 つの班全ての終点の位置を各班の方眼紙に記入する。
5. この終点分布をもとにして，$x = 0, \pm 1, \pm 2, ...$ の位置にある終点の数を調べ図のように度数分布図を作る。
6. 同様に $y = 0, \pm 1, \pm 2, ...$ の位置にある終点の数を調べて度数分布を作り上記の分布図に加える。（どちらかに斜線を入れると良い）

6.3　課題

1. サイコロの目が公平に出るようにするためにはどのようにふったらよいか考えなさい。
2. 終点の分布は，原点（出発点を中心）としてどのようになっているか。
3. x, y 軸の度数分布から何が言えるか検討しなさい。
4. サイコロを振る回数を多くしていくと終点の度数分布はどのようになるか予想してみなさい。
5. この実験と気体の分子運動とはどんな点が似ているか考えなさい。
6. 出発点と終点との二乗平均距離 $\sqrt{R^2}$ は，サイコロを振る回数を N，一回ふるごとに進む距離を l とすると $\sqrt{N}L$ に近づく。各班の平均距離を求めて理論値 $\sqrt{N}l(l$=1cm) と比較しなさい。

第7章　オシロスコープの使用法

は，電気信号を目に見える信号に変換する装置として低周波数から高周波数までの様々な波形を観察したり電子回路の動作を調べたりするのに用いられるもっとも基本的な装置である．従来波形を陰極線管[1]に表示させていた．最近は液晶を用いたモニターが用いられている．

7.1　オシロスコープの構造と機能

オシロスコープは，大きく分けて

(1) ブラウン管（CRT）

(2) 加速電源

(3) 掃引回路

(4) 水平及び垂直増幅回路

から構成される．以下簡単に各部の説明をしておく。

ブラウン管（CRT）

オシロスコープに用いられる CRT の構造を示す．実際のものでは電子線を出す部分に第一と第二陽極を持ちも水平と垂直用に２組ある．偏向板に正負の電圧を加えることにより電子ビームを上下（左右）に振らせることができる．

加速電源

オシロスコープには，陰極から生じる電子を加速し集束させて蛍光板に輝点（spot）を作るための電源が必要である．これが加速電源と呼ばれる。

[1]日本ではブラウン管と呼ばれる．通常 CRT(Cathode Ray Tube) と言う．

掃引回路

オシロスコープには，陰極線を左右に振らせる**時間軸発振器**（または，掃引回路）と増幅器を持っている．信号電圧波形を見るためには，陰極線を時間に比例させて左右に振らなければならない．繰り返しその模様を表示させるために，水平方向に図に示すノコギリの歯のような波形（）の電圧をかける．ある周波数 f で繰り返す信号を，CRT 上で静止した画像として観察するためには，掃引周波数を f_s，整数を n として，$f{=}nf_s$（$n{=}1$，2，$\cdots$）でなければならない．入力信号の周波数が変化する時にも対応するため，同期掃引方式が用いられる．図に信号，トリガー及び掃引電圧波形を示す．繰り返し信号波形が，ある設定電圧値を越えたときトリガーパルスを作って方形波を作り，それをコンデンサーで積分したノコギリ波形の電圧でする．掃引電圧と信号波形との位置関係は一定だから信号波形は，CRT 上で静止しているのである．

水平及び垂直増幅回路

CRT の偏向は，0.5mm/V 程度であるから CRT 上で 10cm 程度陰極線を振るためには 200V 程度の電圧を発生させなければならない．この回路としてプシュプル増幅器が用いられる．

7.2　オシロスコープの実際

図 7.1 にオシロスコープ（ケンウッドティー・エム・アイ社製二現象オシロスコープ CS-4125A）の正面パネルを示す．各々の切り換えつまみなどの意味を順に述べる．中央のブラウン管に信号を表示させる．ブラウン管には約 1cm のグリッドが方眼紙のように入っている．この一区画が，1division である．背面にもつまみなどがあるが本実験では使用しないので説明を省略する。

1 CRT 表示部。垂直 8div(80mm)，水平 10div(100mm) の範囲で表示される。

2 電源スイッチ。押す電源が入りもう一度押すと切れる。

3 パイロットランプ。2 と連動して電源オンになると点灯する。

4 CAL 端子。校正用の電圧端子でプローブの調整に使用する。1V_{p-p}[2]正極性，1kHz の周波数の方形波を出力する。

5 **INTEN**　表示された信号を表す線の輝度を調整する。

[2] $1V_{p-p}$ はピークとピークの電圧が 1 ボルトであることを意味する。

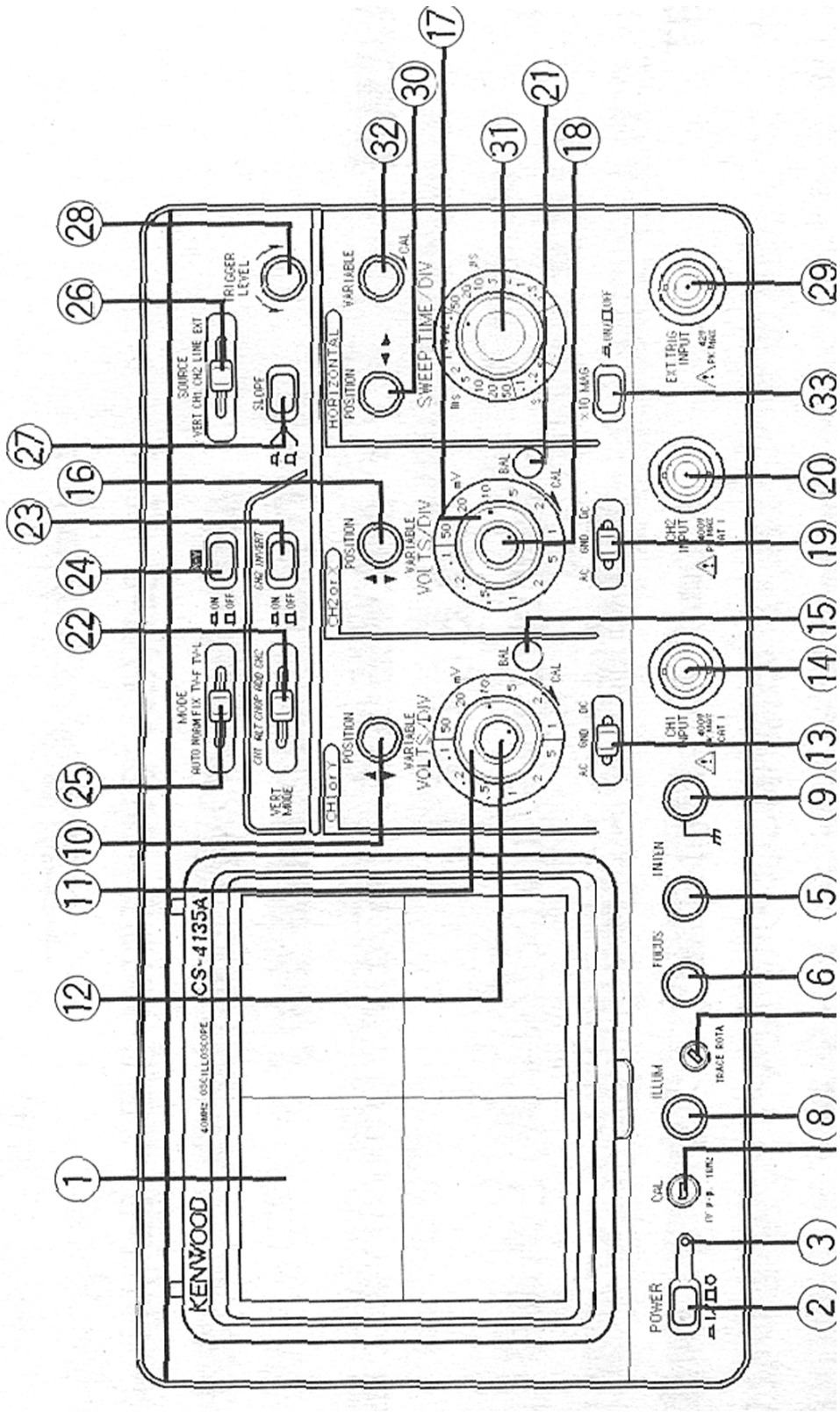


図 7.1: オシロスコープの全面パネル

6 **FOCUS** 鮮明な表示が得られるように焦点を調整する。

7 **TRACE ROTA** トレースローテーション。水平輝線の傾きを調整する。

8 **ILLUMI** CRT の照明。実験に使用する CS-4125A では使用できない。

9 GND 端子　グランド（アース）端子のこと。他の機器との間で共通のアースをとりたい場合に使用。

10 **POSITION** CRT に表示される CH1 の波形の垂直位置の調整に使用する。X-Y 動作（後述）時には，Y の位置調整に使う。

11 **VOLT/DIV** CH1 の垂直軸感度を設定する。1-2-5 のステップで切り替えられる。VARIABLE を CAL 位置にすると校正された垂直軸感度が得られる。X-Y 動作時には Y 軸の感度を設定するのに使用。

12 **VARIABLE** CH1 の垂直軸感度を微調整するのに使用する。VOLTS/DIV のレンジ間を錬側的に変えられる。

13 **AC-GND-DC** CH1 の垂直軸入力信号の結合方法を選択する。X-Y 動作時には Y 軸の入力切替器となる。

AC 入力信号は交流結合となる。直流成分は除去される。

GND 垂直増幅器の入力が設置され接地電位を確認できる。

DC 入力信号は直流結合となり直流成分を含めた観測を行える。

14 **CH1 INPUT** CH1 の垂直軸入力端子。X-Y 動作時には Y 軸入力端子となる。

15 **BAL** CH1 の DC バランス調整器。おそらく使用しない。

16 **POSITION**

17 **VOLTS/DIV** CH2 の垂直軸感度を設定する。

18 **VARIABLE** CH2 の垂直軸感度を微調整するのに使用する。

19 **AC-GND-DC** CH2 の垂直軸入力信号の結合方法を選択する。X-Y 動作時には X 軸の入力切替器となる。

20 **CH2 INPUT** CH2 の垂直軸入力端子。X-Y 動作時には X 軸入力端子となる。

21 **BAL** CH2 の DC バランス調整器。おそらく使用しない。

22 **VERT MODE** 垂直軸の動作モードの選択。

CH1 CH1 の入力信号を CRT に表示。

CH2 CH2 の入力信号を CRT に表示。

ALT CH1 と CH2 の入力信号を掃引ごとに切り替えて CRT に表示。

CHOP CH1 と CH2 の入力信号を掃引と無関係に，250kHz の繰り返し率で交互に表示。

ADD CH1 と CH2 の入力信号の合成波形 (CH1+CH2) を CRT に表示。ただし，CH2 を INVERT にしている場合 CH1-CH2 を表示。

23 **CH2 INVERT**　つまみを押し込んだ状態で CH2 の入力信号表示の極性が反転。

24 **X-Y** つまみが押し込まれた状態で CH1 を Y 軸，CH2 を X 軸とする X-Y 表示させる。

25 **MODE** トリガ操作モードを選択する。

AUTO トリガ信号により掃引を行う。ない場合は輝線が表示される。

NORM トリガ信号により掃引を行う。適正なトリガ信号がなければ輝線が表示されない。

FIX 同期レベルは固定となり，TRIGGER LEVEL に無関係に同期がかかる。

TV-F 複合映像信号の垂直同期パルスが抽出されてトリガ回路に結合される。（本実験では使わない。）

TV-L 複合映像信号の水平同期パルスが抽出されてトリガ回路に結合される。（本実験では使わない。）

26 **SOURCE** トリガ信号を選択。

VERT トリガ信号源は，VERT MODE で選択される。VERT MODE の設定により選択されるトリガ信号源を表 7.1 に示す。

CH1 CH1 の入力信号がトリガ信号源となる。

CH2 CH2 の入力信号がトリガ信号源となる。

LINE 商用電源の電圧波形がトリガ信号源となる。

EXT EXT TRIG 端子に入力された信号がトリガ信号源となる。

27 **SLOPE**　掃引がトリガされる信号の傾きの極性を選択する。つまみが押されていない場合はトリガ信号源となる入力信号の立ち上がりでトリガされる。押された状態では立ち下がりトリガされる。

28 **TRIGGER LEVEL**　トリガレベルの調整。トリガ信号波形の傾きのどの点でトリガを開始するか設定する。

表 7.1: VERT MODE で選択できるトリガ信号源

VERT MODE	トリガ信号源
CH1	CH1
CH2	CH2
ALT	CH1, CH2 が 1 掃引ごとに選択される
CHOP	CH1
ADD	CH1 と CH2 の合成信号

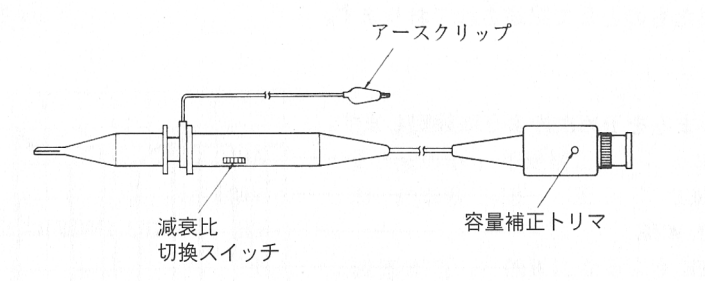


図 7.2: プローブの外形

29 **EXT TRIG**　外部トリガの入力端子。SOURCE を EXT にした場合にこの端子に入力された信号がトリガ信号源となる。

30 ↔**POSITION**　CRT に表示される波形の水平位置の調整を行う。X-Y 動作時には，X 軸の位置調整器となる。

31 **SWEEP TIME/DIV**　掃引時間の切換。0.2μs/div∼0.5s/div の間を 1-2-5 ステップ，２０レンジで切換可能。VARIABLE を右に回しきった CAL 位置で校正された指示値になる。

32 **VARIABLE** 掃引時間の微調整に使う。SWEEP TIME/DIV のレンジ間を連続的に可変で行える。右に回しきった CAL 位置で掃引時間が校正される。

33 ×**10MAG** つまみを押すと表示を CRT 中央を基準に左右 10 倍に拡大。

オシロスコープへの信号の入力には図 7.2 に示すを用いる。プローブとオシロスコープとの接続は，を用いる．本体に附属するプローブ（PC-54）は，減衰比を 1/1 及び 1/10 に切り換えられるようになっている。

表 7.2: 測定前の設定

つまみ	設定
MODE	AUTO
SOURCE	VERT
VERT MODE	CH1（CH2 INVERT は OFF で有ることを確認）
SLOPE	＋
TRIGGER LEVEL	中央
CH1 or Y 及び CH2 or Y ↕POSITION	中央
VARIABLE	CAL
VOLTS/DIV	5V/DIV
AC-GND-DC	GND
HORIZONTAL ↔ POSITION	中央
VARIABLE	CAL
SWEEP TIME/DIV	0.2ms/DIV
×10MAG	OFF

7.3 ファンクションジェネレーター（発振器）

本節ではオシロスコープの実習で使用するについて取り扱い方法を簡単に述べておく。
超低周波 1mHz から高周波 20MHz 位までの，（或いは），鋸波や三角波などを発振できる装置を発振器と言う。図 7.3 にケンウッド　ティー・エム・アイ社製低周波発信器の概観を示し，それぞれのスイッチの働きについて使用する機能の部分のみ説明する。

1 **指標** ダイヤル目盛を指示する。

2 **ダイヤル目盛板** １０－１００の目盛が表示されている。

3 **周波数ダイアル** これを回転させて発振する周波数を調整する。目盛板の示す値に FREQ. RANGE スイッチ６の倍率をかけると周波数がわかる。

4 **電源スイッチ** 押した状態がオン。

5 **インディケーター** 電源オン時に点灯する。

6 **FREQ. RANGE(Hz)** 発振周波数の切換を行う。下記の５段階で切り換える。

- ×1 10-100Hz
- ×10 100Hz-1 kHz

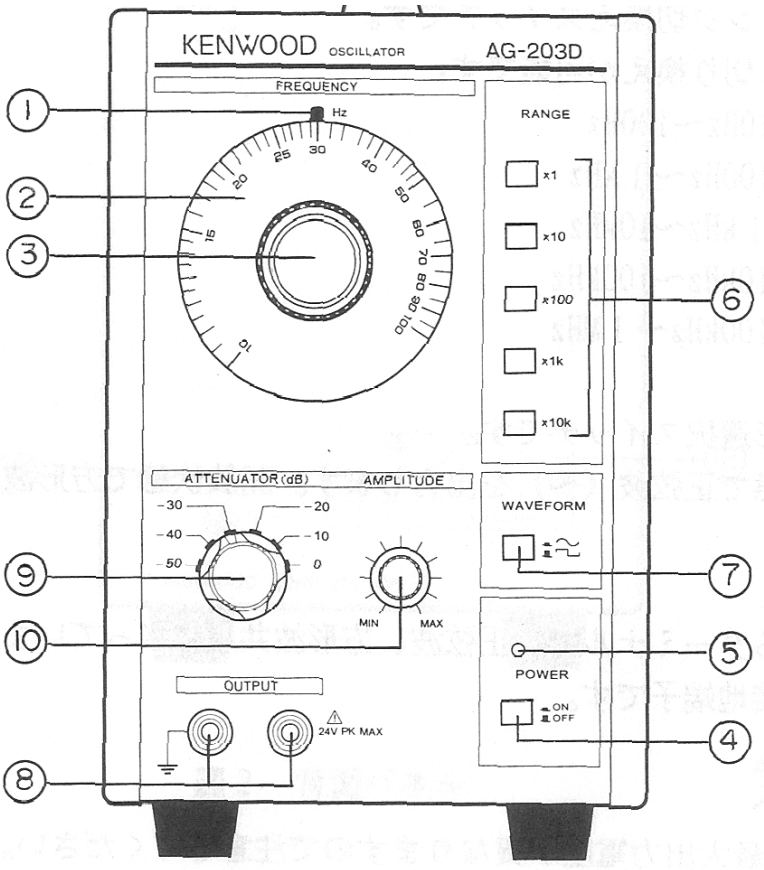


図 7.3: ファンクションジェネレーター（発信器）の正面

- ×100 1 kHz - 10 kHz
- ×1k 10 kHz - 100 kHz
- ×10k 100 kHz - 1 MHz

7 **WAVE FORM** 出力信号の波形を選択する。押し込まれた状態では正弦波（∼）を出力する。押し込まれていない状態では方形波を出力する。

8 **OUTPUT**　信号を出力する端子である。

9 **ATTENUATOR** 出力減衰器。０－５０ dB を６段階で切り換えられる。

10 **AMPLITUDE** 出力電圧の振幅を連続的に調節できる。

7.4 オシロスコープの実習

使用器具：オシロスコープ，ファンクションジェネレーター，マイク，音叉セット，ゴム頭槌

7.4.1 測定前のチェック

プローブのとオシロスコープの アースを接続 しておくこと。

1. 4 の CAL 端子とプローブを接続して，波形を表示させよ。その際，11 と 31 のつまみを使って見やすい大きさに調節すること。
2. １１と３１のレンジを読み取り記録し，デジタルカメラで撮影すること。その後，表示された波形の 周期と振幅を報告 すること。

7.4.2 オシロスコープとファンクションジェネレーター

1. ファンクションジェネレーターの出力端子とオシロスコープの垂直入力端子を BNC コネクタを使って接続せよ.
2. ファンクションジェネレーターの出力波形，出力電圧及び周波数をいろいろ変えてオシロスコープで観察せよ.
3. 表示させた波形をデジタルカメラで撮影すること。ファンクションジェネレーターの目盛とオシロスコープの目盛を記録しておくこと。

7.4.3 音の観測

人間の聴覚では，おおよそ 20Hz から 20,000Hz 域の音を認識できる。音の波をオシロスコープに表示させてみよう。そしてデジタルカメラで CRT 上に表示された音波の画像を撮影する。

1. マイクロフォンをオシロスコープの CH1 と接続せよ。マイクロフォンのリード線から２本の線が出ている。赤い方をプローブの針と銀色の方をプローブのアースクリップと接続する。
2. 人間の声や携帯電話の音をマイクロフォンでひろって観察せよ。
3. 音叉の固有周波数を見て，時間軸（３１のつまみ）を適切な値に調節しなさい。音叉の選択は各自で行いなさい。なるべく多くの音叉について実験を行いなさい。

4. 音叉を付属のゴム頭槌でたたいて，発する音を集音し垂直軸の調節をしなさい。

5. 音叉をゴム頭槌でたたいてマイクロフォンに近づけて波形を観察せよ。（オシロスコープの画面から周波数または周期を読み取って報告しなさい。）

うなり

1. 音叉のセットには限りがあるので，各班互いに調節して同じ周波数の音叉を用意する。一方に，テープなどを貼り付けて固有周波数を少し変化させる。

2. なるべく同時に二つの音叉を鳴らす。

3. どのように音が聞こえるか報告しなさい。また，二つの音叉が鳴っている間の波形をオシロスコープに表示させてデジタルカメラで撮影しなさい。

7.4.4　図形による周波数の測定

1. ファンクションジェネレーターを 2 つ用意し，それぞれオシロスコープの垂直入力端子（CH1 と CH2）に接続する．

2. オシロスコープの水平感度ツマミを X-Y のところに固定する．

3. 一方のファンクションジェネレーターを正しいと仮定して，もう一方の周波数を決定するものと考えよう．[3]

4. 未知と仮定したファンクションジェネレーターの周波数に対し，正しいと仮定したファンクションジェネレーターの周波数を 1：1 や 1：2，1：3 等と変えてみよ．そのときオシロスコープには図に示した Lissajous 図形が得られる．

5. こうして得られた Lissajous 図形をデジタルカメラで撮影しなさい．

[3] 本来は，未知の周波数を決定するために用いられる手法である．

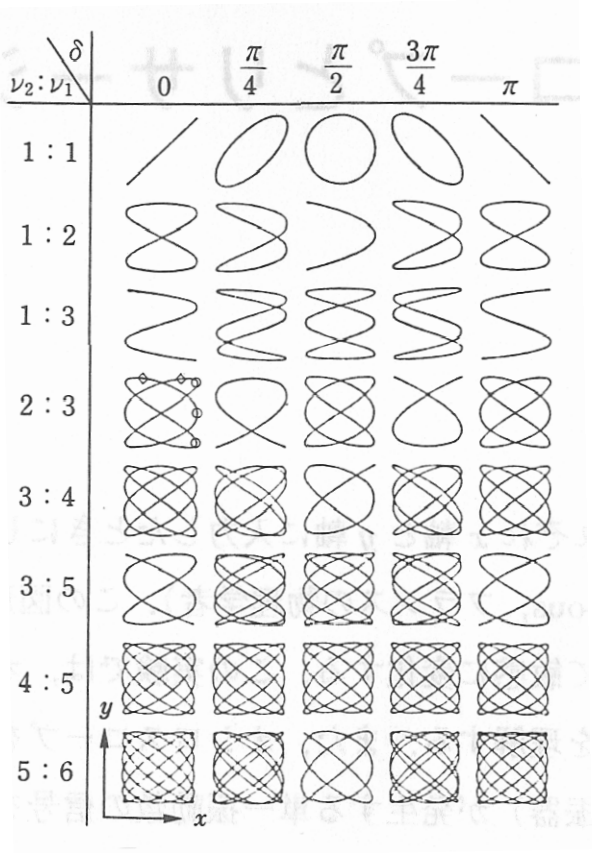


図 7.4: リサージュ図形の例。

7.4.5　報告事項と課題

撮影した写真をレポートに貼り付けて報告しなさい。ただし，オシロスコープのつまみやファンクションジェネレーターの発振周波数など必要な実験条件については写真の近くに記載すること。また，以下の課題を調べて報告しなさい。

1. 二つの正弦波

$$\begin{aligned} x &= A\cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \\ y &= B\sin(2\pi f_2 t + \phi_2) \end{aligned} \tag{7.1}$$

が実際にリサージュ図形のようになることを確かめなさい。すなわち上の式で適当な値を入れてグラフに x-y 表示してみなさい。コンピュータを使ったら容易である。

2. うなりの実験で二つの音叉の振動数の差を知るにはどうしたらよいか？

3. 音の強さ，高さ，音色（音の三要素）と音波の何とが関係しているか考察し報告 せよ。

第8章　単振り子の周期

軽いひもの一端を固定し，他端に錘をつけて自由に振れるようにしたものを単振り子という。振幅が小さい場合，単振り子の振動は調和振動と呼ばれ，自然界にあるいろいろな振動運動の典型として大変重要である。
ルネッサンス末期イタリアの物理学者ガリレオ・ガリレイが，教会で揺れるランプを見て，その周期がいつも一定であること（振り子の等時性）を発見したという逸話は有名である。小学校では，５年生理科で単振り子について実験を行い，その性質を定性的に学習することになっている。
この実験では，単振り子の周期がひもの長さ，錘の質量，振幅によってどのように変化するかを定量的に調べる。

8.1　理論

図に示すように質量を無視できる紐の固定端から錘の重心までの距離を L，錘の質量を m，紐が鉛直方向となる角を θ とすると錘の運動方程式は

$$mL\frac{d^2\theta}{dt^2} = -mg\sin\theta \qquad (8.1)$$

で与えられる。ここで g は重力加速度であり，錘の大きさは L に較べて十分小さいと仮定する。
振幅が小さい（$\theta \ll 1$）とき，$\sin\theta \approx \theta$ であるから

$$L\frac{d^2\theta}{dt^2} = -g\theta \qquad (8.2)$$

となる。この微分方程式の解は，

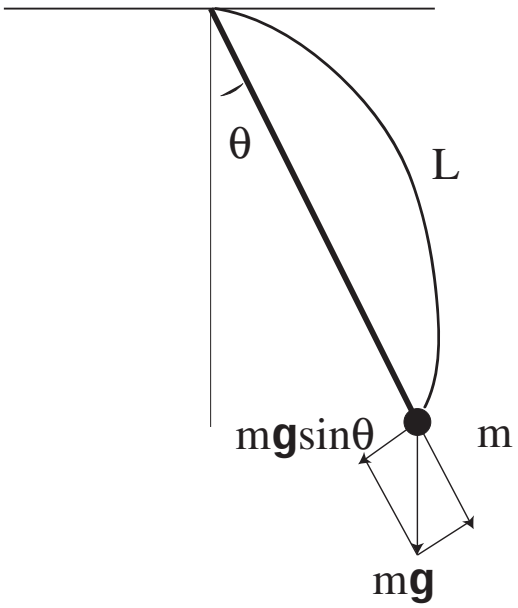


図 8.1: 単振り子の運動

$$\theta = A\sin\left(\sqrt{\frac{g}{L}}t\right) \qquad (8.3)$$

で与えられ，単振り子の周期 T は，

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (8.4)$$

で表される。

8.2　実験方法

実験に必要な器具：振り子実験器（錘（金属球：大中小各一個），角度板，紐，支持台，支柱），ストップウォッチ，メジャー

1. 振り子実験器を組み立てる。
2. 金属球の大きさ，金属球の中心から水平棒下端までの距離（振り子の長さ），振幅を表のように変えて７種類の周期を測定し，それぞれの周期を T_1, ..., T_7 とする。
3. 各測定は，次のように行う。
   a. 振り子が１０回振動する時間をストップウォッチで測定する。（注意：時間は紐が鉛直になる瞬間を計るものとする。振り子が数回振れてから時間を計り始めると良い。）
   b. a. の測定を５回繰り返す。（注意：５回の測定値のバラツキが ± 0.1 秒以下になるまで練習しなさい。）
   c. b. の測定結果より振り子の周期を求める。
4. 以上の測定結果より，錘の質量，振り子の長さ，振幅と周期との間にどのような関係があるか考察しなさい。
5. レポートでは考察結果が読者に納得してもらえるように表現方法を工夫しなさい。

	金属球の大きさ	振り子の長さ	振幅	周期
測定１	小	50cm	10 度	T_1
測定２	大	50cm	10 度	T_2
測定３	中	50cm	10 度	T_3
測定４	中	50cm	30 度	T_4
測定５	中	50cm	60 度	T_5
測定６	中	30cm	10 度	T_6
測定７	中	15cm	10 度	T_7

8.3　参考

近似 $\sin\theta \approx \theta$ と出来ないほど振り子の振幅 α が大きい場合，周期 T は，

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left[1 + \frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{2} + \frac{9}{64}\sin^4\frac{\alpha}{2}...\right] \tag{8.5}$$

で与えられる。考察において上式の括弧内第二項以下の効果についても考察しなさい。

第9章　センサープロジェクト–暗くなると電灯が点く回路を作る–

あたりが暗くなると自動的に街灯が点灯したり，風呂の湯が沸くとブザーが鳴って知らせたり，身の回りにはいろいろ便利な装置がある。それらは大変難しい装置のように思えるが，センサー（光や温度を感じ取る素子）を使うと非常に簡単に作製できる。ここでは，暗くなると発光ダイオードLEDが点灯する回路を製作する。同時にオームの法則と抵抗による電位分割の概念を習得する。

9.1　電気回路の基礎事項

9.1.1　オームの法則

抵抗（抵抗値Rオーム [Ω]）の両端に電圧（Vボルト [V]）をかけると，抵抗を流れる電流（Iアンペア [A]）は，電圧に比例する。

$$I = \frac{V}{R} \tag{9.1}$$

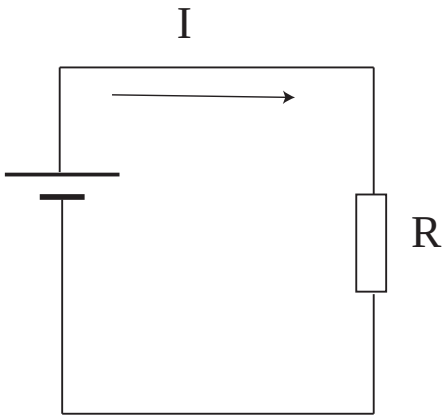


図 9.1: オームの法則

9.1.2　電位分割

図9.2において，点A-C間にかかる電圧 V_0 をA-B間にかかる電圧 V_1 とB-C間にかかる電圧 V_2 に分割できる。

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_0, V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0 \tag{9.2}$$

図9.2の回路は電子機器に必要な電圧を供給する場合にしばしば使用される回路である。図9.3に示すように抵抗 R_1 をサーミスター[1]に置き換え，R_2 と並列にブザー

[1]温度によって抵抗値が変化する素子

を取り付けると，ある一定温度以上になるとブザーが鳴る装置を作製できる。

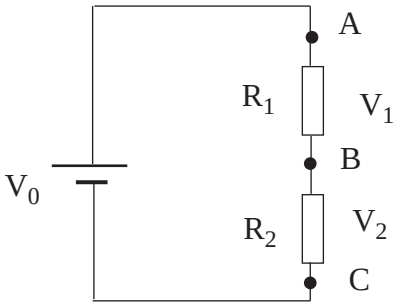


図 9.2: 電位分割

9.1.3 光依存抵抗

照射した光の強度によって抵抗値の変わる素子を光依存抵抗 (LDR; Light Dependent Resistance）という。本実験では LDR として半導体硫化カドミウム（CdS）を用いる。この素子は，暗いと大きな抵抗値となり，明るいところでは小さな抵抗値を示す。

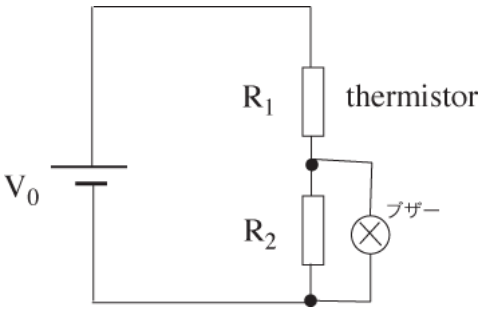


図 9.3: 電位分割の応用例

9.2 実験方法

使用器具：ブレッドボード，発光ダイオード，硫化カドミウム，電源装置，電圧計，アナログテスター

9.2.1 実験手順

電位分割実験

1. 図 9.4(a) の回路を組む。V_0=8[V] とする。
2. A-B 間の電位差 V_{AB}，BC 間の電位差電位差 V_{BC}，CD 間の電位差 V_{CD}，DE 間の電位差 V_{DE} を測定しなさい。得られた結果を分析し，報告しなさい。

3. 図 9.4(b) の回路を組む。V_0=8[V] とする。

4. A-B 間の電位差 V_{AB}，BC 間の電位差電位差 V_{BC}，CD 間の電位差 V_{CD}，DE 間の電位差 V_{DE} を測定しなさい。得られた結果を分析し，報告しなさい。

9.2.2　硫化カドミウム (CdS) の特性

1. 光が当たっているときの抵抗値をテスターで測定しなさい。

2. 手で光を遮ったときの抵抗値をテスターで測定しなさい。

9.2.3　発光ダイオードの特性

図 9.5 を参照しなさい。発光ダイオードに電圧をかけ（足の長い方を+としなさい），徐々に電圧を上げる。ダイオードが点灯する電圧を測定しなさい。

9.2.4　回路の製作

暗くなると発光ダイオードが点灯する回路を設計し，製作しなさい。回路の形，電圧，抵抗の値はいくらが良いか考えなさい。
製作した回路の図，電圧，抵抗値を書きなさい。また電圧，抵抗値について何故その値を選んだのか説明しなさい。

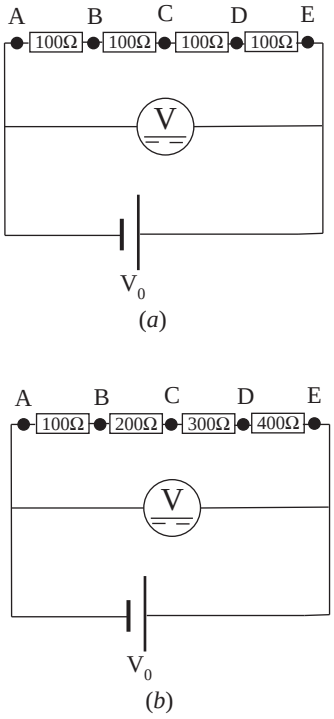


図 9.4: 電位分割実験

9.2.5 補足事項

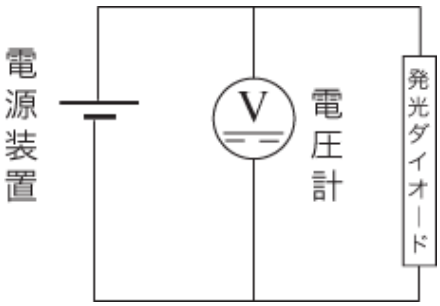


図 9.5: 発光ダイオードの特性を
調べる回路

図 9.6(a) に使用するブレッドボードの写真を示す。図のように４等分されている。そのうちの一部分で説明しておく。縦方向には両端に X と Y と表記されていて，1, 5, 10, ..., の順に番号をつけてある。横方向には右から左に向かって A, B, C, ..., J まで記号を割り当てている。縦方向 X または Y に関して５個の穴がある。縦方向の５つの並びでは互いに電気的につながっている。一方横方向では A–E，F–J まで電気的に繋がっている。このことを念頭に置いておいてもらいたい。図 9.6(b) に別種のブレッドボードの模式図を示す。灰色の影を施した部分が電気的に繋がっている。(b) を具体例として参考にしなさい。

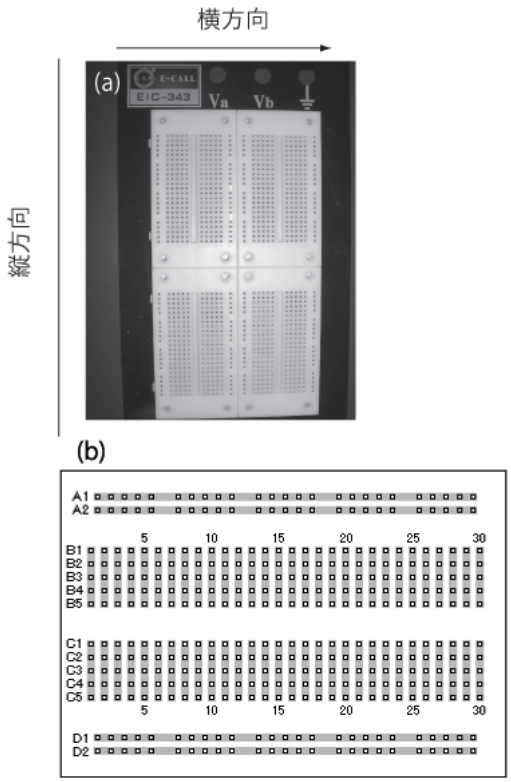

横方向
縦方向
(a)
E-CALL
EIC-343
Va
Vb
(b)
A1
A2
5
10
15
20
25
30
B1
B2
B3
B4
B5
C1
C2
C3
C4
C5
5
10
15
20
25
30
D1
D2

図 9.6: ブレッドボード

第10章　デジタルマルチメーターの実習—Stefan-Boltzmannの法則

黒体の総放射エネルギーは絶対温度 T の４乗に比例する。シュテファンが実験的に見いだし，ボルツマンが理論的に導いた。黒体の単位表面から単位時間内に半空間に放出されるエネルギー S は,

$$S = \sigma T^4$$

で与えられる。比例係数 σ を Stefan-Boltzmann 係数という。$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ［W/(m^{2}K^4］である。
白熱電球は，タングステン W で出来たフィラメントに電流を流して高温になって光を放つ。即ち白熱電球は空間にエネルギーを放っているのである。従ってフィラメントの絶対温度と放出されるエネルギーは Stefan-Boltzmann の法則に従うと予測されるのである。以下ではその予測を確かめると共にデジタルマルチメータの使用法を習得する。

10.1　実験手順

用意するもの：40，１００ W の白熱電球，スライダック（一次入力を商用交流 100V とし，二次出力側の電圧を可変にできる変圧器），デジタルマルチメータ DMM 一台，アナログ式交流電圧計一台

- 電球の抵抗を測定する。それを R_0 としてデータ処理で使用する。
- 第一の DMM の電源を入れ、交流電流測定モードにする。
- 黒いプローブ線を LO とかかれた端子に赤いプローブ線を I とかかれた端子にそれぞれつなぐ。
- このうち一本を電球に、もう片方をスライダックの OUTPUT 端子につなぐ。

- 電球とスライダックの「OUTPUT」のあいている方同士をコードでつなぐ。
- 第二の DMM の電源を入れ、交流電圧測定モードにする。
- 黒プローブ線を LO 端子に，赤プローブ線を HI と書かれた端子につなぐ。
- これらを電球の両端につなげる。
- スライダックのつまみが 0 であるることを確認してから、プラグをコンセントにさす。
- スライダックのつまみを回して電圧を 10V ずつ上げて、電流を記録する。
- 100V まで測定したら、スライダックのつまみをを 0 にもどし、プラグをコンセントから抜く。

データ処理は以下の要領で行い表にする。この表をもとに縦軸電力 P 横軸絶対温度 T^4 のグラフを作成する。

- 測定した交流電圧 V と交流電流 I から消費電力 P=V×I を計算して求める。
- 抵抗 R=V/I で求める。抵抗の比 R/R_0 を求める。比と温度の関係を示す図 10.2 から絶対温度を読み取る。

電圧 (V)	電流 (A)	電力 P(W)	抵抗 R(Ω)	比抵抗 R/R_0	温度 T(K)	T^4
0						
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						

電力 P と T^4 の間には,

$$P \approx \sigma T^4 \tag{10.1}$$

という関係がある。これは単位時間に温度 T の黒体から放出される電磁波のエネルギーを与える Stefan-Boltzmann の法則でる。定数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$〔W $m^{-2}K^{-4}$〕は Stefan-Boltzmann 定数である。

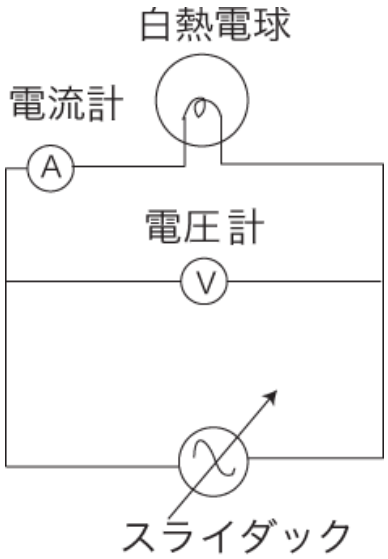


図 10.1: 測定の配置図

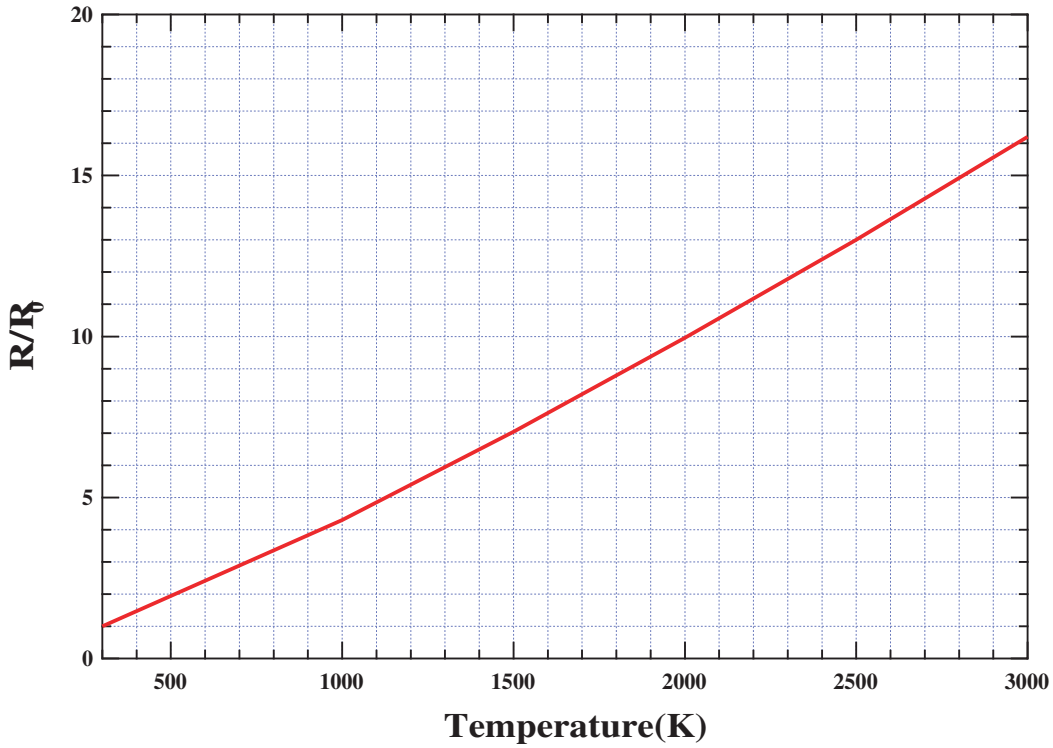


Fig. 1 Relative resistivity of W versus temperature (K)

図 10.2: タングステンの比抵抗対絶対温度

10.2　課題

1. 測定結果を表にまとめ，横軸に絶対温度 T の 4 乗，縦軸に電球で消費される電力 P を取ってグラフにまとめなさい。$P \propto T^4$ となっているか？報告しなさい。

2. Stefan-Boltzmann の法則の応用例について考えなさい。

第11章　熱の仕事等量Jの測定（未完成）

James Prescott Joule によって熱とエネルギーが等価であり，その換算は，仕事等量を使えば得られることが示された。この実験により，熱とは熱素（フロギストロン）という実体ではなく，熱の本性はエネルギーそのものであることが確立された。

11.1　理論

本実験では，抵抗に電流を流して発生する熱量を測定し，電流のした仕事と発生した熱量の値から熱の仕事等量 J を決定する。電流した仕事を W［J］，発生した熱量を H［cal］とすると，熱の仕事等量 J は，

$$J = \frac{W}{H}\ (\mathrm{J/cal}) \tag{11.1}$$

で与えられる。電流のする仕事 W は，電流 I と電圧 V の値から算出できる。単位時間に発生する仕事は電流と電圧の積 IV で与えられるから，電流を流した時間を Δt として，この間にする仕事 ΔW は，

$$\Delta W = IV\Delta t \tag{11.2}$$

である。発生する熱量を求める方法は，魔法瓶に入れた水の中に抵抗を入れて電流を流し，上昇する水温を測定する。
水温が余り上昇しない間は，抵抗から発生する熱の殆どは，水に吸収される。

第12章　熱電対の利用

物理実験では温度をパラメータとして測定することが多い。その際極低温や高温での温度を知る必要がある。そのとき用いられるのが熱電対である。本章では熱電対の特性を理解し実際使用してみることを目的とする。

12.1　理論

12.1.1　温度の定義

日常使われる温度は，熱さ寒さを表す度合いである。しかし，物理学的には温度は熱平衡の尺度である。熱平衡にある二つの物体の温度は等しいと言う。熱平衡にある物体 A と B があるとする。このとき第三の物体 C に対して物体 B と接触させたとき B と C が熱平衡にあるならば物体 A と C も熱平衡にある。これは**熱力学の第０法則**と呼ばれる。このことで直接物体 A と C を接触させなくとも物体 B を温度計としてやれば A と C の温度が等しいか否か判定できる。
微視的に温度を定義すると物質を構成する粒子の熱運動エネルギーの平均を決める尺度と言うことになる。粒子の運動エネルギーは，接触により互いに交換している。しかしエネルギー収支が平均としてつりあっている場合２物体の温度は等しいと考える。
日常よく使われる温度基準摂氏℃は，一気圧における水の沸点（液体状態と気体状態の相平衡状態）を１００とし氷と水の混合状態（液体と固体の相平衡）を０として１００等分したものである．一方，物質の性質に依存しない温度を定義することもできる。これは Kelvin 卿によるもので数値の後に K をつけて表す。絶対零度を 0〔K〕とし水の三重点を 273.16〔K〕(0.01 ℃) と定義されている。今温度が T_1,T_2（$T_1 > T_2$）の熱源の間に働く可逆過程の熱効率 η は，$\eta = (T_1 - T_2)/T_1$ で与えられる。これが絶対温度の定義である。日常使われる摂氏温度との関係は，T=T〔℃〕+273.15〔K〕である。絶対温度における温度差と摂氏温度における温度差は等しくしてあるのである。

12.1.2　熱電対

よく知られているように温度の測定には水銀やアルコールを細い管に入れてある温度計を用いる．その他，**熱電対**や抵抗温度計などもある．その中で

実験に最も頻繁に用いられるのが熱電対である.
孤立した導体[1]内部で，電子によって熱の移動があると低温側に電子が蓄えられ高温側では電子の不足した状態となる。すなわち導体内部に電場ができているので起電力 V_T が生じているのである。発生した起電力を**熱起電力**[2]という。温度差が小さい場合，V_T は，温度差 ΔT に比例し

$$V_T = \alpha \Delta T$$

で表される。比例係数 α は，**ゼーベック Seebeck 係数**という。
異なる二種類の金属 A，B を二つの接点 P，Q で接続するものとする。接点 P，Q の温度をそれぞれ T と T+ΔT とする。接点 P における温度を一定とすれば熱起電力の値から接点 Q における値を知ることが出来る。

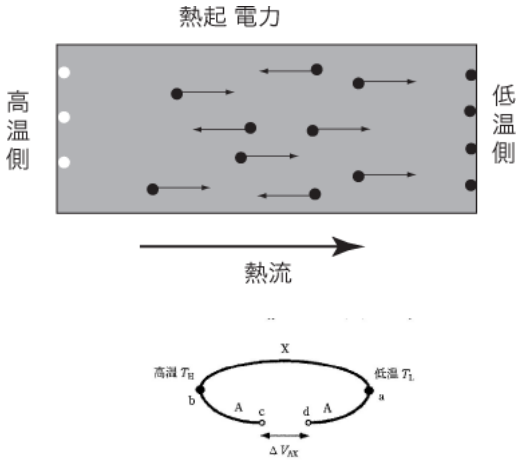


図 12.1: 熱起電力の発生

12.2 実験

12.2.1 熱電対の校正

用意するもの：アルメルクロメル熱電対（または K 熱電対と呼ばれる），アルコール温度計，ビーカー，蒸留水 (水道水で代用可)，ヒーター（ガスバーナーなどでもよい)，氷，DMM，理科年表，テフロン製試験管

実験手順は以下の通りである。実験のための配置図を図 12.2 に示す。図で灰色の線は赤色の代用で正（プラス）側に接続する。

- ビーカーに水を適当量入れる。
- 熱電対から出ている赤い線を DMM の正側のプローブと接続し，黒い線を負側のプローブと接続する。
- 霙状態にした氷を適当な容器（魔法瓶などがよい）に入れて DMM と接続した熱電対から出ている導線を入れる。
- 熱電対と温度計をビーカーに入れる。

[1]金属のことと考えて良い。
[2]thermoelectric power

- ビーカーを中の水が沸騰するまで加熱する。沸騰するまでの間温度計と熱電対の起電力 (DMM の電圧表示を読んで）を記録してグラフにする。例えば 5 ℃ごとに記録せよ。
- 沸騰してから冷ますまでの間も温度計の値と熱電対の起電力を記録する。
- 記録したデータを横軸に温度計の指示値，横軸を起電力にとってグラフを作製せよ。

氷定点より低い温度を測定する場合，熱電対の起電力は負の値になる。低温を扱う場合は，校正された熱電対を購入して[3]使用するか理科年表などに与えられた表を使って温度を知るしかない。次節に液体窒素を寒剤として使用した測定課題を示しておく。

12.2.2　エチルアルコールの融点または凝固点

エチルアルコールは，エタノールとか単にアルコールと呼ばれる。要するに酒類の成分である。融点は，-114.5 ℃，沸点 78.3 ℃である。次の要領でエチルアルコールの融点を求めてみる。用意するものは，前節のほか理科年表などに記載されているクロメルアルメル熱電対の起電力表である。この実験では必ず皮手袋を着用すること。また第 4 章 4.5 節で液体窒素取り扱いに関する注意点をまとめてあるので予め熟読しておくこと。実験の配置図は，基本的に 12.2 と同じである。

- 内部を清浄にしたテフロン製試験管にエチルアルコール適当量を注入する。
- 熱電対を底まで沈まないようにエチルアルコールの中に入れる。図では熱電対の絵として黒い線と灰色の線及びその接点としての黒丸で代用させている。
- 液体窒素を口の広い大きな専用の容器[4]に注ぐ。
- エチルアルコールを入れた試験管ごと液体窒素で満たされた容器に入れてエチルアルコールを固化させる。
- 固化したら試験管を取り出し，発泡スチロール製保温容器に挿入する。挿入した時刻を基準にして一定時間ごとに室温下で起電力を測定する。
- 起電力を時間の関数として測定して横軸に時間，縦軸に起電力のグラフを書く。

[3]研究ではしばしば用いられるがかなり高価である。
[4]デュワー瓶という。

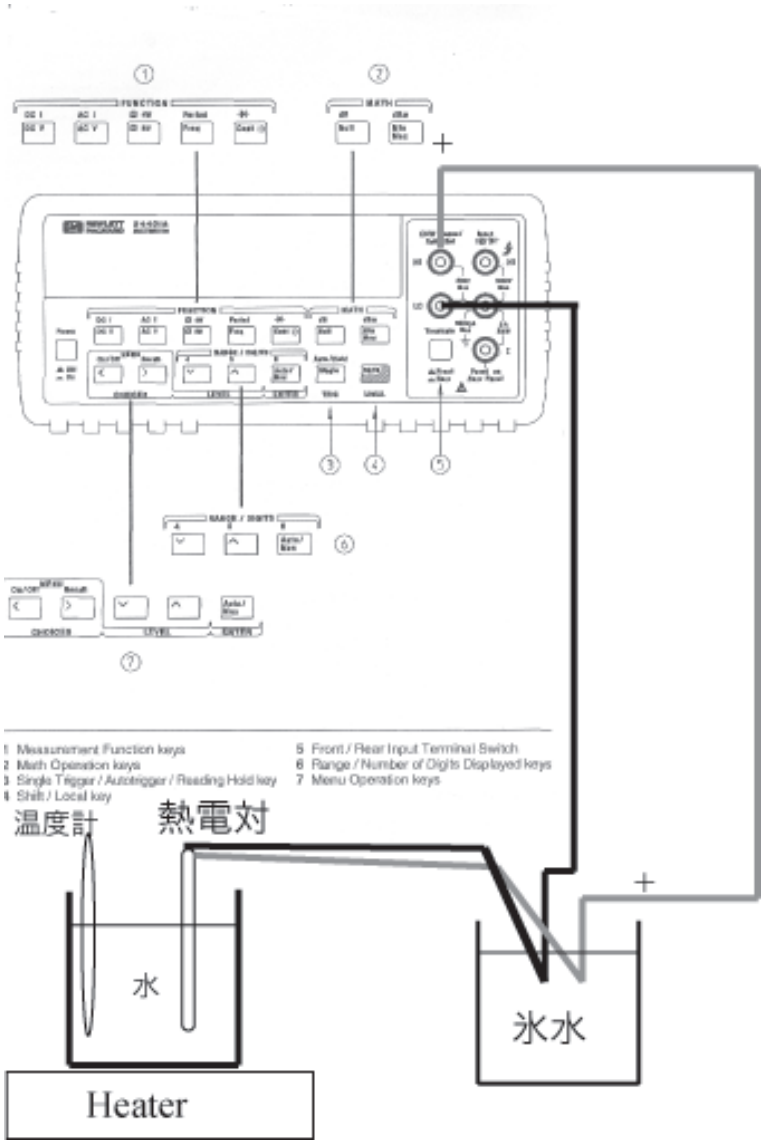


図 12.2: 熱電対を校正するための実験配置図

図 12.3: 熱電対をエタノールに入れたところ

- 固体と液体の混合した状態になって，起電力が一定値を示すところを見出す。
- 逆に液体から固体になる様子を起電力と温度の関係で見ても良い。(凝固点の決定)

室温の物体を液体窒素に入れると当然のことながら液体窒素は沸騰する。その際人体にとっては十分冷たい窒素が発生する。冷たい窒素に触れて空気中の水蒸気も凍って白い煙のようになる。このような状態になったとき皮膚を直接晒すようなことをしなければ特に危険なことにはならない。

12.3　課題

上記の要領に従い，摂氏１００℃ (T_1=373 K) の起電力 V_1，摂氏０℃ (T_1=273 K) の起電力 V_2=0mV，エチルアルコールの融点（凝固点）-114.5 ℃ (T_3=158.5K) における起電力 V_3，液体窒素の沸点ー１９６℃（T_4=77 K）における起電力 V_4 が決定された。横軸に絶対温度，縦軸に熱起電力をとってグラフにし，得られたデータをつなぐ最適の関係式（直線，又は多項式）を求めよ。また，関係式を使って使用した熱電対に関する熱起電力の表を作りなさい。実験データの処理，特に最小自乗法については 3.5.4 を参照しなさい。

12.4　アルメルクロメル標準熱起電力表

以下に K 熱電対（アルメルクロメル）の標準熱起電力表を掲載する。この表の数値は，あくまでも参考であって使用している熱電対の起電力の値と異

表 12.1: 熱起電力表の作成例

温度 (K)	起電力 (V)
80	...
90	...
...	...
370	...

なる。

表 12.2: アルメルクロメル熱電対の標準熱起電力表（氷定点)。起電力の単位は μV である。

°C	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
-200	-5891	-6035	-6158	-6262	-6344	-6404	-6441	-6458	-	-	-
-100	-3554	-3852	-413	8 -4411	-4669	-4913	-5141	-5354	-5550	-5730	-5891
0	0	-392	-778	-1156	-1527	-1889	-2243	-2587	-2920	-3243	-3554
°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	397	798	1203	1612	2023	2436	2851	3267	3682	4096
100	4096	4509	4920	5328	5735	6138	6540	6941	7340	7739	8138
200	8138	8539	8940	9343	9747	10153	10561	10971	11382	11795	12209
300	12209	12624	13040	13457	13874	14293	14713	15133	15554	15975	16397
400	16397	16820	17243	17667	18091	18516	18941	19366	19792	20218	20644
500	20644	21071	21497	21924	22350	22776	23203	23629	24055	24480	24905
600	24905	25330	25755	26179	26602	27025	27447	27869	28289	28710	29129
700	29129	29548	29965	30382	30798	31213	31628	32041	32453	32865	33275
800	33275	33685	34093	34501	34908	35313	35718	36121	36524	36925	37326
900	37326	37725	38124	38522	38918	39314	39708	40101	40494	40885	41276

第13章　コンデンサーの充放電

13.1　予備知識

コンデンサー（キャパシターともいう）の二つの電極にそれぞれ $\pm Q$ の電荷を与えたものとする。電極間の電位差（端子電圧）が，V_0 とするとコンデンサーの容量 C は，

$$C = \frac{Q}{V} \tag{13.1}$$

で与えられる。
図のように一定電圧 V_1 をかけてコンデンサーを充電する場合，コンデンサー両端の電圧を V とすると，

$$Q = CV \tag{13.2}$$

$$\frac{V_1 - V}{R} = I(= \frac{dQ}{dt}) \tag{13.3}$$

である。整理すると，

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_1 - V}{CR}, \tag{13.4}$$

$$\frac{d(V - V_1)}{dt} = -\frac{V - V_1}{CR}$$

となる。故に

$$\frac{d(V - V_1)}{V - V_1} = -\frac{1}{CR}dt \tag{13.5}$$

となり，両辺を積分すると

$$ln|V - V_1| = -\frac{t}{CR} + \alpha$$

である。ここで α は積分定数である。$V \leq V_1$ だから

$$V = V_1 - e^{\alpha}e^{-\frac{t}{CR}}$$

で与えられる。t=0 で V=0, $t \to \infty$ で $V \to V_1$ だから

$$e^{\alpha} = V_1$$

となる。従って

$$V = V_1(1 - e^{\frac{t}{CR}}) \tag{13.6}$$

となる。13.6 の概略図は，Figure 2 のようになる。
一方 Figure 3 のようにコンデンサーを充電してから抵抗を通じて放電させ

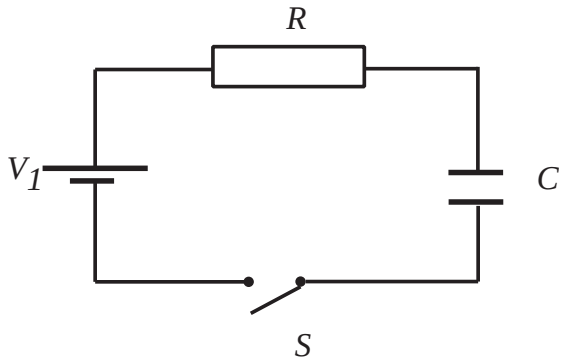


Figure 1

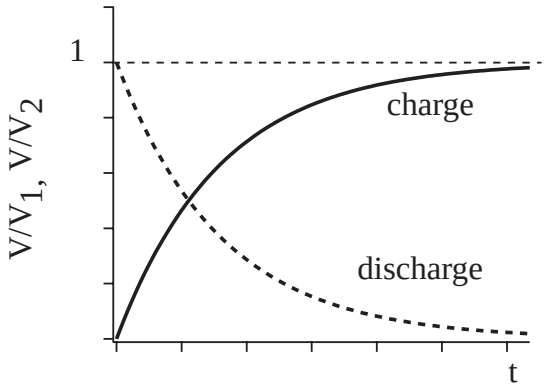


Figure 2

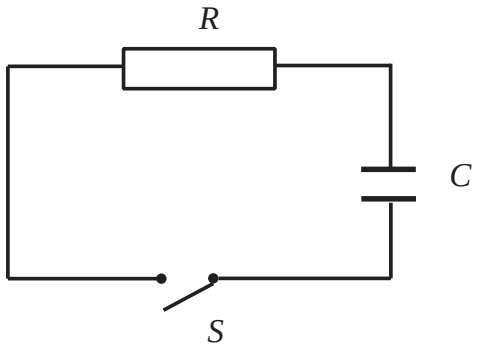


Figure 3

図 13.1: コンデンサーの充放電。Figure 1 はスイッチを閉じるとコンデンサーに充電される。Figure 2 は充電及び放電時におけるコンデンサーにかかる電圧の時間変化。Figure 3 は放電回路。

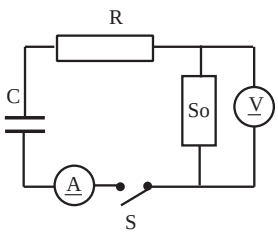


Figure 4

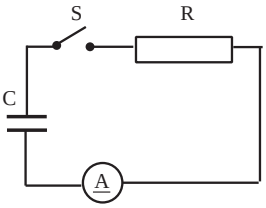


Figure 5

図 13.2: 実験装置の配置。Figure 4 は充電の場合で図中の S_0 は，電源である。Figure 5 は放電回路。

るときは，初期条件 t=0 において V=V_2 で解けばよい。すなわち，

$$V = V_2 e^{-\frac{t}{CR}}$$

である。Figure 2 の点線で示すような時間変化を示すことになる。 ただし，Figure2 では便宜上の理由で初期値で規格化した図を示しているので必ずしも V_1=V_2 とはかぎらない。
本実験ではコンデンサーに充電及び放電するときの電流変化を測定しその充放電特性を観測する。

13.2　実験方法

実験器具

コンデンサー，抵抗（65,260Ω）[1]，スイッチ（コンデンサー，抵抗，及びスイッチは一体になっている），直流電圧計，直流電流計，配線用コード（バナナチップが両端につけられている），直流電源[2]

13.2.1　実験手順

充電放電特性は 2 種類の抵抗に関して行うこと。要するに同じ測定を抵抗値を変えて測定する。
直流電流計のレンジは，R=65Ω のとき 30mA に，R=260Ω のときは 10mA を選ぶこと。Figure 4 では直流電源を長方形で表している。

[1]抵抗値が，65 ではなく 51Ω のものや 260 の代わりに 300 や 220Ω を使っている場合があるのでよく確かめること。
[2]予算の関係で二種類の電源が存在する。電源によっては，電圧を変える回路を中間に入れる必要がある。このことについては実験時に伝える。

13.2.2 充電特性の測定方法。

1. Figure 4 のようになるように各素子間をコードで接続する。
2. コンデンサー両端を短絡（ショート）して蓄えられていた電荷を放電する。
3. 直流電源のスイッチを入れる。出力電圧を 2〔V〕に設定する。この際, 直流電源についている電圧計ではなく回路に組み込んだ電圧計を使う。
4. 回路のスイッチを閉じる。閉じた瞬間の時刻を 0 として以降 10 秒ごとに電流値を読み取り記録する。その間電源の出力電圧が 2V になるように調整する。時間がある程度経過すると，電流値の変化が少なくなるので測定時間の間隔は適宜長くしても良い。
5. 電流がほぼ 0 になると，測定を止めてスイッチを開く。これで充電作業は終了したことになる。次の放電実験に使用するので受電された状態を保つように注意して扱うこと。

13.2.3 放電特性の測定

1. 前節で充電したコンデンサーを使って Figure 5 のような回路を組む。
2. スイッチを閉じる。スイッチを閉じた瞬間を時刻 0 として以降 10 秒ごとに電流値を測定し記録する。電流の変化が小さくなったら測定間隔を適宜長くして良い。
3. 電流が流れなくなったら測定を終了する。

13.3 データの整理と考察

測定結果をグラフにまとめなさい。横軸に経過時間，縦軸に電流値を書きなさい。グラフと予備知識のところで説明した理論と一致しているかどうか吟味しなさい。曲線，縦軸と横軸で囲まれた面積から流れた全電荷量を計算しコンデンサーの容量を求めなさい。[3]

蛇足

回路を流れる電流 I は,

$$I = |\frac{dQ}{dt}| = |\frac{d(CV)}{dt}| = C|\frac{dV}{dt}|$$

[3]老婆心ながら，電流値の単位を考慮して計算すること。

で表される。充電時には,

$$I = C|\frac{dV}{dt}| = CV_1\frac{1}{CR}e^{-\frac{t}{CR}} = \frac{V_1}{R}e^{-\frac{t}{CR}}$$

となる。放電時には,

$$I = C|\frac{dV}{dt}| = CV_2\frac{1}{CR}e^{-\frac{t}{CR}} = \frac{V_2}{R}e^{-\frac{t}{CR}}$$

である。

抵抗値の読み方

本実験で使用するような小型の抵抗器では，カラーコードを使って抵抗値と誤差を示している。以下に便宜のため表として纏めておく。番号は図を参照しなさい。

表 13.1: 抵抗のカラーコード

色	数値 1,2	乗数 3	許容誤差 4
黒	0	1	-
茶	1	10^1	$\pm 1\%$
赤	2	10^2	$\pm 2\%$
橙	3	10^3	$\pm 0.05\%$
黄	4	10^4	-
緑	5	10^5	$\pm 0.5\%$
青	6	10^6	$\pm 0.25\%$
紫	7	10^7	$\pm 0.1\%$
灰	8	10^8	-
白	9	10^9	-
銀	-	10^{-2}	$\pm 10\%$
金	-	10^{-1}	± 5 %

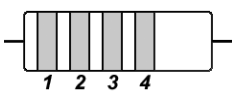
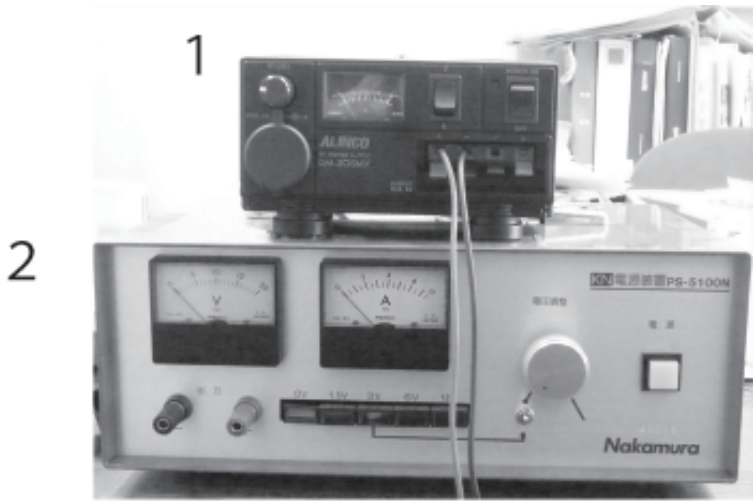


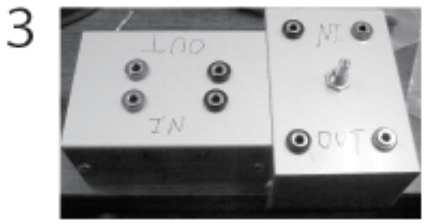
図 13.3: 抵抗のカラーコードの配置

13.4 電源と電圧の分割

予算などの関係で本実験では全て同一の装置を用いる実験を行えない。本節では利用する直流電源と電圧分割器について説明する。実験前にはどの装置を利用するのか確認すること。直流電源と電圧分割器の写真をそれぞれ図 13.4(a) と (b) に示す。実験の際電圧分割器と併用する電源は，図の中で 1 と



(a) 直流電源



(b) 電圧分圧器

図 13.4: (a) 直流電源。1 または 2 と表記した二種類用意されている。(b) 電圧分割器。3 または 4 と表記した二種類存在する。直流電源 1 と一緒に利用する。

表記してある。赤と黒の導線をそれぞれ図のような出力端子に接続し，電圧分割器 3 または 4 の IN 側に接続する。電圧分割器 3 に接続した場合には電圧の調整（2 V) は，電源 1 側で行う。電圧分割器 4 に接続した場合は，電源

１側でも分割器についているつまみを回転させることによって所定の電圧に調節可能である。２と表記した電源を使用する場合は電源から直接コンデンサーの充放電回路を接続すればよい。

第14章　レンズ及び球面鏡の働き（光学台）

ここで扱う光は，

- 光は均質な媒質中で直進する
- 光の進路は可逆的
- 一つの光線は他の光線に無関係に進む
- 反射及び屈折の法則に従う

という法則に従う。このような光線の集まりとして光の性質を研究する分野を**幾何光学**と呼ぶ。ここでは幾何光学に習熟することを目的とする。

14.1　光学部品の働き

14.1.1　レンズの働き

レンズの中心を通り，レンズの面に垂直な直線を**光軸**という。（図 14.1）ここでは薄いレンズを取り扱う。

14.1.2　凸レンズの働き

光軸に平行なレンズに入射した光は，光軸上の一点 F に集まる。この点 F を**焦点**と言い，レンズから焦点までの距離を**焦点距離**（f）と言う。図 14.1 でレンズの右側から光軸に平行な光線を入射するとその光はレンズの左側の光軸上に集まるので左側にも焦点 F' があることになる（図 14.3)。
種々の角度でレンズに入射した光線は，それぞれ決まった方向に曲げられるが，代表的な光線について曲げられ方をまとめると次のようになる。

1. 光軸に平行な光線は，レンズに曲げられて光源と反対側にある焦点を通る。
2. レンズの中心を通る光線は，曲げられずに直進する。

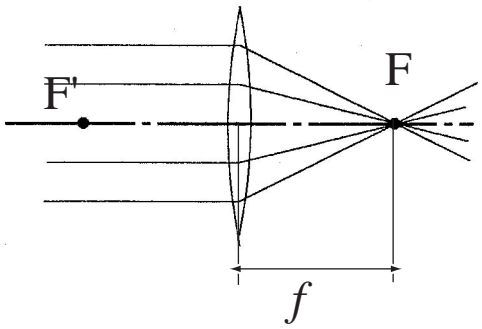


図 14.1: 光軸と薄いレンズの焦点

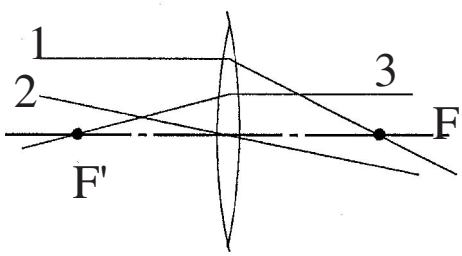


図 14.2: 薄いレンズの対称性

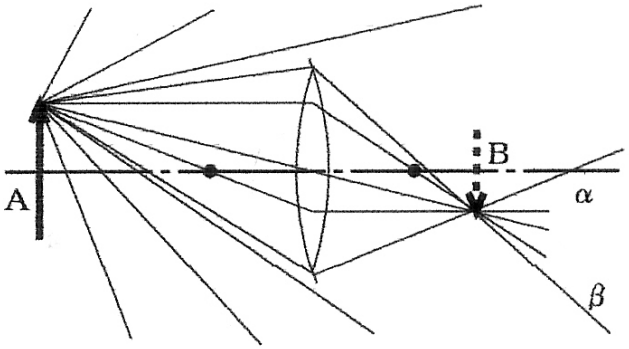


図 14.3: 薄いレンズによる実像

3. 焦点 F' を通って来た光線は，レンズで曲げられて光軸に平行な方向に進む。

レンズ L から，焦点距離以上に離れた光軸上に点 A に物体を置く (図 14.3)。物体の一点から出てあらゆる方向に広がっていく光のうち，レンズに入射した光は曲げられて，再び一点に集まる。従ってこの位置（点 B）に白い紙を置くと，物体の形が紙に映る。これを**実像**という。この像は上下が逆になっているので，**倒立実像**である。また，紙をおかずに $\alpha \sim \beta$ の範囲に目を置いてみると，点 B に実際に物体があるように見える。実像のできる位置は，上記 1,2,3 の光線を使って，図 14.4 の様に作図により求めることができる。また，レンズから物体までの距離 a，レンズから像までの距離 b 及び焦点距離 f の間には次の関係式がある。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \tag{14.1}$$

像の**倍率**m は，

$$m = \left|\frac{b}{a}\right| \tag{14.2}$$

である。
焦点とレンズの間に物体を置いたとき，図 14.5 に示すように物体の一点から出た光は，レンズで曲げられても一点には集まらず，広がって行ってしまうので実像はできない。しかし，$\alpha \sim \beta$ の範囲に目を置いてみると，光はあたかも点 B から出て来たかのように見える。つまり点 B に物体があるように見えるのである。これを**虚像**と言う。
この像は，上下が逆になっていないので**正立虚像**である。この場合も式 14.1, 14.2 は，成立する。但し，像の位置がレンズに関して物体と同じ側にあるので，$b < 0$ とする。

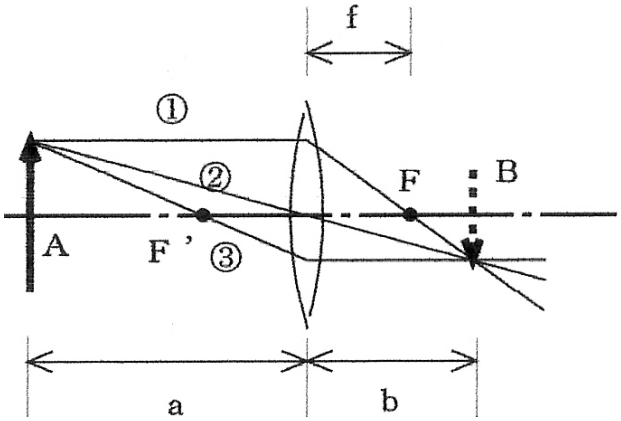


図 14.4: 作図による実像位置の求め方

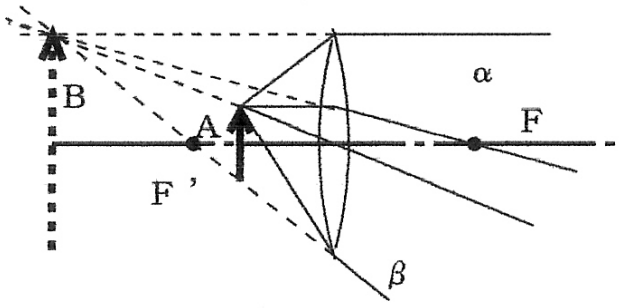


図 14.5: 虚像

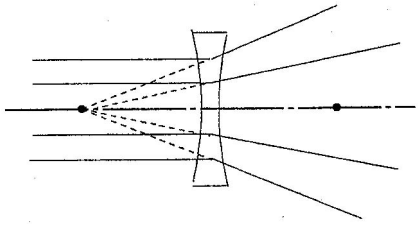


図 14.6: 凹レンズの焦点

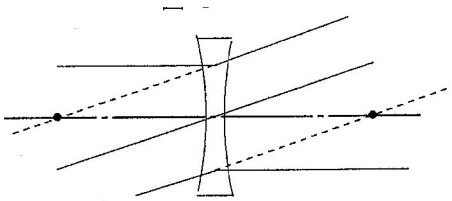


図 14.7: 凹レンズによる光の屈折

14.1.3 凹レンズの働き

図 14.7 において，光軸に平行に**凹レンズ**に入射した光線は，光軸上の一点 F' から出たかのように広がっていく。点 F' を凹レンズの焦点という。レンズに関して F' と対称な点 F も焦点である。凹レンズによる光線の曲げられ方をまとめると次の通りである。

1. 光軸に平行な光線は，レンズで曲げられて，光源と同じ側の焦点から出たかのように進む。
2. レンズの中心を通る光線は,（図 14.8）曲げられずに直進する。
3. 光源と反対側の焦点に向かう光線は，レンズに曲げられて光軸に平行に進む。

図 14.9 に示すように，光軸上の点 A に物体を置く。その物体の一点から出た光は凹レンズで曲げられて広がっていくが，それらは全て点 B から出たかのように進む。$\alpha \sim \beta$ の間に目を置いてみると点 B に像が見える。これは**正立虚像**である。像の位置は，図 14.10 に示すように作図により求めることができる。また，レンズと物体の距離 a，レンズと像の距離 $\mathbf{b}$ 及び焦点距離 f との間には式 14.1 の関係式が成立する。但し，凹レンズの場合 $f < 0$ であるとする。ここで，像が物体と同じ側にあるとき $b < 0$ である。また，像の倍率 m は式 14.2 で表せる。

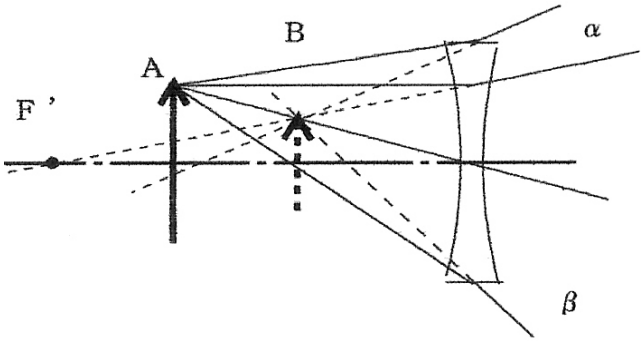


図 14.8: 凹レンズの焦点

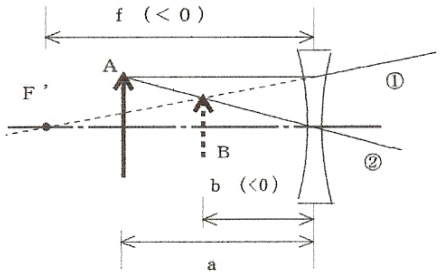


図 14.9: 凹レンズの焦点距離，正立虚像，倍率

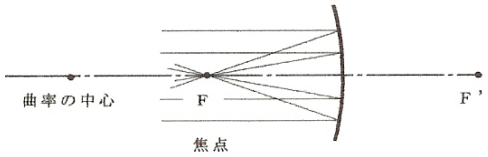


図 1 0

図 14.10: 球面鏡

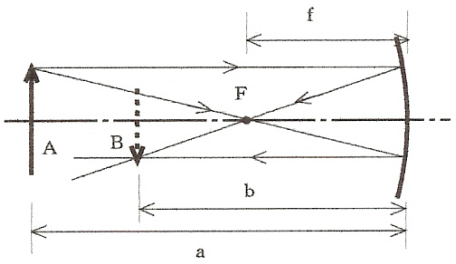


図 14.11: 球面鏡の働き

14.1.4 球面鏡の働き

球面の一部を切り取って鏡にしたのが球面鏡である。球面鏡には凹面鏡と凸面鏡があり，凹面鏡は凸レンズと，凸面鏡は凹レンズと同じ働きをする。ただ，レンズの場合は，レンズに入射した光はレンズを通過して反対側に進む。しかし球面鏡の場合は反射されて元の位置に戻ってくる点が異なっている。球面鏡の場合も式 14.1 及び 14.2 が成立するが，物体と像が鏡の同じ側にある場合に $b > 0$ としなければならない。また，凸面鏡の焦点距離は負とする。なお，焦点距離 f は，球面の曲率半径 R の半分である。($f = R/2$)（図 14.10，14.11 参照）

14.2 装置と器具

光学台１台，平面鏡１枚，凸レンズ２枚，凹レンズ１枚，目盛り付きガラス板２枚，キーソケット１個，視差棒１個，測距棒（長さ 130mm）１個，ガラス板枠３個，レンズばさみ１個，キャリア７個，物差し（３０ cm）１本，凹面鏡

14.3　実験方法

本実験では，使用する機器が，変更されているので指導者の説明に従うこと。例えば下に鴨フィルムは，現在では矢印に変更されている。

14.3.1　凸レンズによる景色の結像

1. 凸レンズを使って，戸外の景色を白紙の上に映しなさい。
2. 景色が明瞭に映る時の，レンズと紙の距離を物差しで測り，レンズのおおよその焦点距離を求めて報告しなさい。
3. 2. の測定を 2 つの凸レンズについて行いなさい。

14.3.2　結像位置の公式，倍率の公式

1. 光学台上に，キーソケット，鴨フィルム，凸レンズ，スクリーン板をこの順に並べる。
2. キーソケットの電灯を点灯して，鴨フィルムを照らす。この鴨の像が，スクリーン板に最も明瞭に結ぶように，鴨フィルムの位置やスクリーン板を調整する。
3. 鴨フィルムとレンズとの距離 a，レンズとスクリーン板との距離 b を測定しなさい。また，鴨フィルムの大きさとスクリーン板状の像とを比較することにより，像の倍率 m を測定しなさい。
4. a の値を種々（5 箇所）変化させて，2，3 の測定を行い報告しなさい。
5. 以上の測定値から $ab/(a+b)$ 及び b/a を計算し，式 14.1 と 14.2 が成立しているかどうか考察しなさい。
6. 1 − 5 の測定及び考察をほかの凸レンズについても行いなさい。

14.3.3　凹レンズの焦点距離の測定

$$f = \frac{ab}{a-b} \tag{14.3}$$

1. 光学台上にスクリーン板，凸レンズ（焦点距離の短い方を使用する），鴨フィルムの順に並べる。
2. 鴨フィルムの像がスクリーン板のうえに最も明瞭になるように位置を調整する。

3. 凹レンズは，凸レンズとスクリーン板の間に入れる。
4. 凹レンズとスクリーン板との距離を測定し，これを a とする。
5. スクリーン板の位置を調整し，再び鴨フィルムの像が最も明瞭になるようにする。
6. 凹レンズとスクリーン板との距離を測定し，これを b とする。
7. 式 14.3 より f を求めて報告しなさい（測定は５回行いなさい)。

14.4 課題

1. 式 14.1 を凸レンズ，凹レンズについてそれぞれ証明しなさい。
2. 式 14.3 を導きなさい。（ヒント　実験**??**操作２で求めた透明目盛り付きガラス板の位置に物体があると考えて凹レンズの結像公式を使えばよい。）

第15章　光の回折

前章と異なりここで扱う光は，波動として扱わなければならない。光を波として扱う学問分野を物理光学または波動光学と呼んでいる。
最近では数千円でボールペン程度の大きさのレーザーポインターが市販されている。本章ではこのような安価なレーザーを使って光の波としての性質を確かめてみよう。

15.1　光の回折現象

光は，電磁波の一種である。特に 400 nm から 800 nm 程度の波長を持つ光のことを可視光という。電磁波であるから横波である。光の波動性は，干渉，**回折**(diffraction)，偏光とい現象により確立されている。
波が障害物を回り込んで伝播する現象をいう。回折は，音波や（海の）波で顕著に見られる。日常生活おいて光の回折を観測しがたいのは，光の波長が障害物に比して十分大きいからである。回折は，”波面の各点は，新しい波の源である。”という Huygens の原理により簡単に説明できる。

光の回折現象を使った応用例として**回折格子**(diffraction grating) がある。回折格子とは，白色光を波長ごとに分ける光学素子である。最も単純な回折格子は，図のように板に等間隔で光の通る隙間[1]を設けた透過型回折格子である。隙間の間隔 d は，回折格子の周期と呼ばれ，その逆数 N=1/d は 1mm あたりの隙間の数を与える。今この回折格子に波長 λ の光（平面波）が入射角 i で入射すると

$$d(\sin i - \sin\theta) = 2m\frac{\lambda}{2} \qquad (15.1)$$

を満たす θ 方向で暗く，

$$d(\sin i - \sin\theta) = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \qquad (15.2)$$

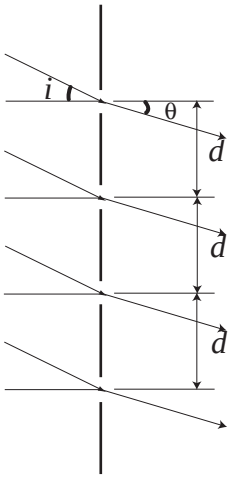


図 15.1: 透過型回折格子

[1] スリットという。

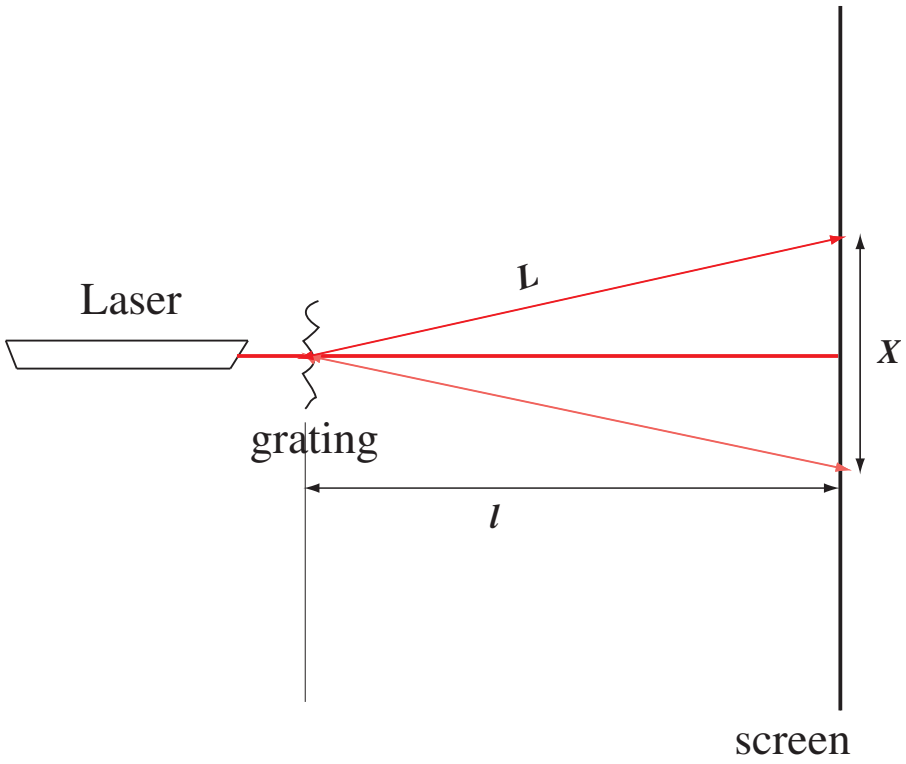


図 15.2: レーザーポインターの回折実験

を満たす方向で明るい。ここで m は，m=0, ±1, ±2, ... で $|m|$ を回折光の次数という。異なる波長では異なる角度で回折されるのであるから太陽光などの白色光は各波長成分を異なる方向に回折される。

15.2 レーザーポインターを用いた回折実験（波長の決定）

実験器具：回折格子実験台，透過型回折格子，レーザーポインター（赤と緑の二種類），スクリーン，定規

15.2.1 実験手順

1. 回折格子実験台の上に赤色のレーザーポインター，透過型回折格子，画用紙のスクリーンを図のように固定する。回折格子からスクリーンまでの距離 l を測定し記録しなさい。

2. スクリーン上に透過したレーザー光の作るスポットを対称中心として明暗（回折パターン）が現れる。スクリーンに現れる明点間距離（図の X）を測定する。回折格子と明点との距離 L は,

$$L = \sqrt{l^2 + \left(\frac{X}{2}\right)^2}$$

から算出する。

3. 以上の測定を回折格子とスクリーン間の距離 l を変えて，ある距離 l に対して１０回繰り返しなさい。距離 l については５種類ほど変えなさい。測定結果を

$$\lambda = d\frac{(X/2)}{L} \tag{15.3}$$

に数値を代入し波長 λ_R を算出しなさい。ここで d は回折格子の格子間隔で $1/1000\mathrm{mm}^{-1}$ ある。

4. 緑のレーザーポインターにかえて同じ測定を実施しなさい。式 15.3 から緑のレーザーポインターの波長 λ_G を算出せよ。

5. 測定結果の平均を求め平均値と標準偏差を求めて報告しなさい

15.3　課題

(1) 回折現象について調べなさい。また、レーザー光の性質を調べなさい。

(2) Huygens の原理を用いて光の回折によって障害物の影に光が回り込むことを説明しなさい。

(3) 式 15.3 を証明しなさい。

第16章　気柱の共鳴

音は空気の振動である。本実験では音源として音叉を利用する。音叉の振動に気柱を共鳴させ，音の波長を求め空気中における音の伝播速度を求める。

16.1　理論

0°C，1気圧における空気中の音の速度を V_0 とすると

$$V_0 = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{1.403 \times 1.013 \times 10^6}{0.001293}} = 331.4 \times 10^2 cm/s \qquad (16.1)$$

となる。但し γ は空気の比熱比，p_0 は標準気圧，及び ρ_0 は空気の密度である。
実際に空気中を音が伝播するときにはその時の温度及び湿度に対する補正をしなければならない。温度 $t°$ C，気圧 $p$mmHg，水蒸気の分圧 e mmHg の時の伝播速度 V は，

$$V = V_0(1+0.00183t)\left[1+\frac{3}{16}\frac{e}{p}\right] = 331.4\times10^2(1+0.00183t)\left[1+\frac{3}{16}\frac{e}{p}\right] cm/s \qquad (16.2)$$

で与えられる。
実験では進行波と後退波との干渉によって生じる**定常波**（stationary wave）を用いる。図 16.1 のように下部に水面のある管中を音波が進行して定常波が出来る場合，粗な媒質より密な媒質への反射面では**節（node）**を生じる。すなわち入射波と反射波との間に π ラジアン（言い換えると半波長 $\lambda/2$）という位相差を考えなければならない。逆に密から粗な媒質への反射面には**腹（loop）**を生じるから位相差を考えなくともよい。このような定常波の節間又は腹間の距離は $\lambda/2$cm に等しい。今音の波長を λcm，振動数を νs^{-1} とすると

$$\nu = \frac{V}{\lambda} \qquad (16.3)$$

と言う関係がある。よって V は式 16.3 を用いて波長を測定して音叉の振動数 ν を求めることが出来る。

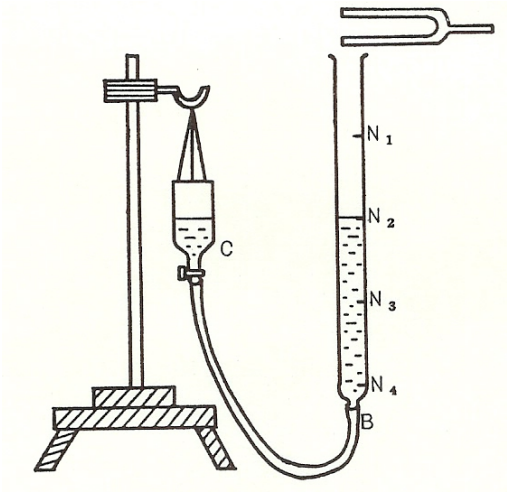


図 16.1: 共鳴管を使った実験配置

16.2　実験手順

共鳴用ガラス管，水位変化装置，音叉（1000 Hz と 2000 Hz の音叉は必ず使用のこと。その他は振動数の音叉は各自選択しなさい。），ゴム頭つち（但し，2000Hz の音叉のみ金属製金槌を利用する），温度計，気圧計
図 16.1 のような装置で AB は，直径約 3[cm]，長さ 80[cm] の水入りガラス管，F は音叉である。測定は少なくとも二つの音叉について行うこと。また節点の測定は，一つにつき 3 から 5 回ほど行いその平均値を使うこと。

1. 音叉 F（振動数 ν）を鳴らし，同時に容器 D を上下して AB 管の水位を変化させる。共鳴して大きな音を発したとき水面の高さは節点となる。高い順に N_1, N_2, N_3, N_4 とし，節点の高さを物差しから読み取りそれぞれ y_1, y_2, y_3, y_4, とする。（４つの節点を求められない場合は，３節点または２節点で終えてもよい。）

2. 気柱には音叉の振動数と等しい振動数の定常波が生じたのであるから，その波長 λ は，下の式 16.4 から求められる。音の気柱内の伝播速度 V は，式 16.5 から求められる。

3. 温度計から気温 t°C を求める。また，気圧計から気圧 p[mmHg] を求める。付録の表から飽和水蒸気圧を求めて e[mmHg] とする。0°C の乾燥空気中における音の伝播速度 V_0 は式 16.6 で求められる。ただし式 16.6 の単位は [cm/s] である。

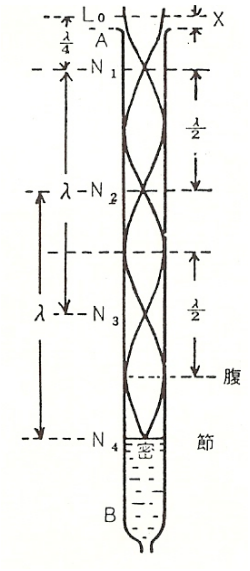


図 16.2: 音波の波長。

$$
\begin{aligned}
y_3 - y_1 &= \lambda_1 \\
y_4 - y_2 &= \lambda_2 \\
\lambda &= \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}
\end{aligned}
\tag{16.4}
$$

$$
V = \lambda\nu \tag{16.5}
$$

$$
V_0 = V(1 - 0.00183t)\left(1 - \frac{3}{16}\frac{e}{p}\right) \tag{16.6}
$$

開口端補正　図 16.2 に示すように，音波の腹は開口端のところではなく少し開口端から出たところに位置する。開口端から測った腹の位置を X と書くと，X は，共鳴管の半径 r の 0.55 から 0.8 倍程度である。前節で説明した方法では X を考慮する必要はない。しかし本実験で使用する f=667 Hz より振動数の小さい音叉では共鳴点を 3 つ程度しか求められないので X を使って得られた音波の波長を補正する必要がある。これを開口端補正と呼ぶ。例えば 1000Hz の音叉で算出した音波の波長と最初の共鳴位置 y_1 を 4 倍した値を比較すると X の値を求められる。

16.3 課題

1. 共鳴法により音叉の振動数を測定する方法と原理について述べなさい。但し，空気中の音速は理論的に算出できるものとする。

表 16.1: 水の飽和蒸気圧

温度（°C）	飽和蒸気圧（mmHg）	温度（°）	飽和蒸気圧（mmHg）
0	4.58	20	17.54
1	4.92	21	18.65
2	5.29	22	19.83
3	5.68	23	21.07
4	6.06	24	22.38
5	6.54	25	23.76
6	7.01	26	25.21
7	7.51	27	26.74
8	8.04	28	38.05
9	8.61	29	30.04
10	9.21	30	31.82
11	9.83	31	33.70
12	10.52	32	35.66
13	11.23	33	37.75
14	11.99	34	39.90
15	12.79	35	42.18
16	13.63	36	44.56
17	14.53	37	47.07
18	15.48	38	49.69
19	16.48	39	52.44

2. f=1000 Hz と 2000 Hz の音叉に関する実験結果から開口端補正の値を求め，振動数の小さい音叉の結果を開口端補正して結果を再検討しなさい。

第17章　データロガーの使用方法

データロガーは、様々なセンサーが出力するデータ（例えば，温度、湿度、照度、振動、電圧や電流等）を取り込んで、任意の時間ごとにデータを表示、記録し、パソコンに出力する機器である。

17.1　実験手順

データロガーの取扱説明書を参考にして，基本機能をマスターして以下の測定を行いなさい。
使用器具：データロガー，温度センサー，氷，ビーカー，ガスバーナー，力センサー（二個），台車（二台），ワイヤー

17.1.1　温度センサーを用いて氷が溶解する過程の温度変化測定

a. 氷をビーカーに入れて，その中に温度センサーを入れる。

b. ガスバーナーを使って氷を加熱する。

c. 温度が１００度になるまで，氷の温度を加熱時間の関数としてデータを記録する。

d. 温度が１００度になったらガスバーナーを止める。

e. 記録したデータから，温度対加熱時間を表すグラフを作成する。またその結果に対して説明しなさい。

17.1.2　力センサーを用いて作用と反作用の力を測定する

a. 二つの力センサーをそれぞれ二台の台車と繋ぐ。

b. 台車を向かい合わせに走らせる。

c. 台車が衝突から停止するまでの間，二台の車に作用する力の変化を記録しなさい。

d. 台車を反対方向に走らせる。

e. 台車を引っ張り合う状態から停止するまでの間，二台の車に作用する力の変化をデータロガーで記録しなさい。

f. 台車を止めなさい。

g. 記録したデータから台車の衝突と引っ張り合い時における力の変化を表すグラフを作成し，説明しなさい。

第18章　太陽電池の負荷特性実験

CO_2 の排出量を削減するために様々な努力がなされている。太陽電池は，CO_2 を放出しないクリーンなエネルギー源として期待されている。太陽電池は，光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電池である。ここでは太陽電池の動作原理を理解すると共にその評価方法について実習する。

18.1　太陽電池の動作原理

18.1.1　金属，半導体，絶縁体

電気伝導の観点から，物質は，良導体である金属，電流を通さない絶縁体，両者の中間に位置する**半導体**に分類される。電気伝導の微視的な説明は，量子力学の知識を必要とする。ここではごく簡単に説明する。

原子は，正の電荷を持つ原子核とその周囲に電子を持っている。原子を熱するなり電子を衝突させると光を放つ。その光をプリズムや回折格子を使って観察すると離散的に光を放っていることがわかる。すなわち，原子中の電子は，特定のエネルギー状態あり，外からエネルギーを得たときより高いエネルギーの状態に移り，再び元の状態に戻る際にそのエネルギー差に相当する光を放つ。このように原子内の離散的なエネルギー状態を殻と呼ぶ。この殻には，原子核から近いところから順に電子が収納されている。この電子のなかで最も原子核から離れた殻（最外殻という）にある電子が電気伝導に寄与できる。それぞれの殻には電子が２個または８個収納されると最も安定する。このように電子が２個または８個収納された状況を閉殻という。

このような電子を特に価電子と呼ぶ。原子が孤立している場合，原子内の状態は離散的である。しかし，原子が多数集まって固体を形成する場合，上に述べた離散的な状態というのは，周囲の影響を受けてぼやけてしまう。このようなぼやけた状態を帯 (バンド）と呼ぶ。金属の場合，このバンドは電子で半分まで埋まっている。一方、半導体と絶縁体ではバンドは，電子で埋まっている。すなわち，電子は外からエネルギー (たとえば電場）を与えても電子は動けないので電気伝導を示さない。電子で埋まっているバンドは，充満帯または価電子帯と言う。一方，電子で埋まっていないバンドを伝導帯という。伝導帯と価電子帯の間には，電子の存在し得ない状態が存在する。この状態もある程度幅を持っていて**禁制帯**またはエネルギーギャップという。ま

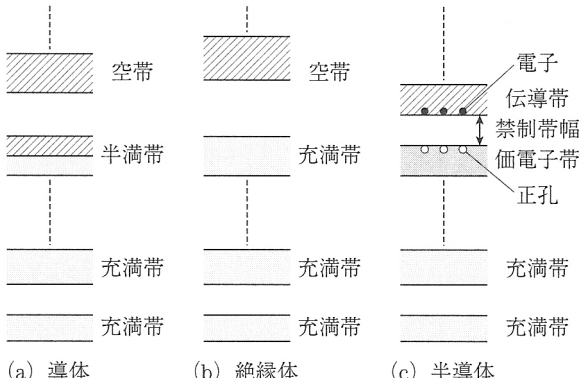


図 18.1: 固体の電子バンド構造.(a) 金属，(b) 半導体，(c) 絶縁体

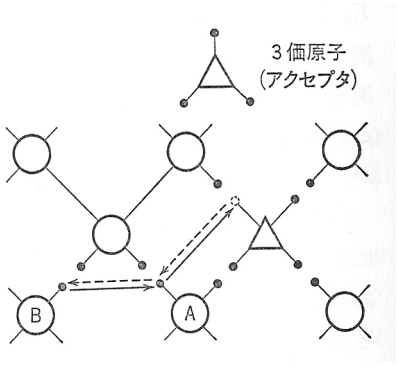


図 18.2: シリコンに入れた 3 族原子。丸はシリコン，三角は 3 族（例えばホウ素）を表す。

た，その幅のことを**バンドギャップエネルギー**という。通常その値を E_g と記す。この様子を図 18.1 に示す。縦軸は，電子のエネルギーを示す。半導体では最も重要なパラメータである。

半導体に外から十分なエネルギー（例えば光照射したり，高温にする），すなわち禁制帯の幅よりも大きなエネルギーを与えると価電子帯の電子は禁制帯を超えて電子で占められていない伝導帯に入る。伝導帯の電子は，電気伝導に寄与する。一方，価電子帯には電子の抜け殻が残る。これを**ホール**または正孔という。ホールは，電子の抜けた後なので正に帯電している。すなわち，あたかも正に帯電した粒子であるかのように振る舞い電気伝導に寄与する。

典型的な半導体は，炭素，シリコン，ゲルマニウムに代表される 4 族の元素でできている。これらの原子の最外殻には 4 個の電子が存在する。4 族の元素は隣あう原子と電子を共有して安定な閉殻構造をとる。しかしこれでは

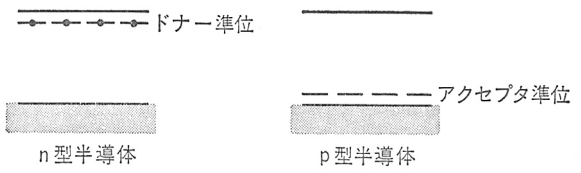


図 18.3: 不純物半導体のバンド構造

電子は自由に動けない。バンド構造で言うと価電子帯は，電子で充満していることに相当する。このような半導体では，外からエネルギーを与えて価電子帯から伝導帯に電子が移って（遷移して）電子と正孔の対ができる。しかし，この他に３または５族の元素を不純物として加えることで電気伝導機能を持たせることが可能である。例えば３族の元素では，最外殻に３個の電子を持ちシリコンの中に入って結合を作る。しかしその際電子が一個不足する。（図 18.2 参照。）この不足した状態は，上に述べたホールであった。すなわちホールによって電気伝導が起こるのである。４族の元素に３族の不純物を導入した半導体のことを正の電気伝導という意味から **p 型半導体**という。５族の元素を導入した半導体は n 型半導体という。n 型，p 型半導体を総称して不純物半導体という。不純物半導体のエネルギーバンド図を図 18.3 に示す。また，３族の原子は，電子を受け取るので**アクセプター**という。５族原子は，過剰な電子を供給するので**ドナー**と呼ばれる。それぞれ価電子帯から電子を受け取りやすいように，あるいは，伝導帯へ電子を供給しやすいようにバンドギャップ内にアクセプターレベルとドナーレベルを形成する。

18.1.2 pn 接合と太陽電池

前節で述べた不純物半導体，n 型と p 型を原子的に接合させて太陽電池を作る。基本的な構造は，整流作用を示す pn 接合ダイオードと同じである。重要なのは n 型半導体と p 型半導体が接合する部分である。この接合面を通して p 型半導体側から n 型半導体へホールが，n 型半導体側から p 型半導体へ電子が流れ込む。説明を簡略化するために p 型側のみを考える。p 型は，電子の抜け殻であるホールがあるので電子が流れ込むと抜け殻を電子で埋められる。これは、電子と正孔の対が生成されるのと逆の現象で（電子と正孔の）再結合という。結果として，接合部分の p 型側は，電子が流れ込むので負に帯電することになる。しかし自由に動ける電子またはホール（電気伝導を担う電子またはホールを**キャリア**という。）はこの領域にはない。同様に n 型の接合部分は正に帯電する。同様に n 型側にも自由に動けるキャリアはない。このように接合面近傍の層には，電気伝導に寄与するキャリアがないので空乏層という。一方，n 型側から p 型側に向かう電場が，半導体の接合部分に生

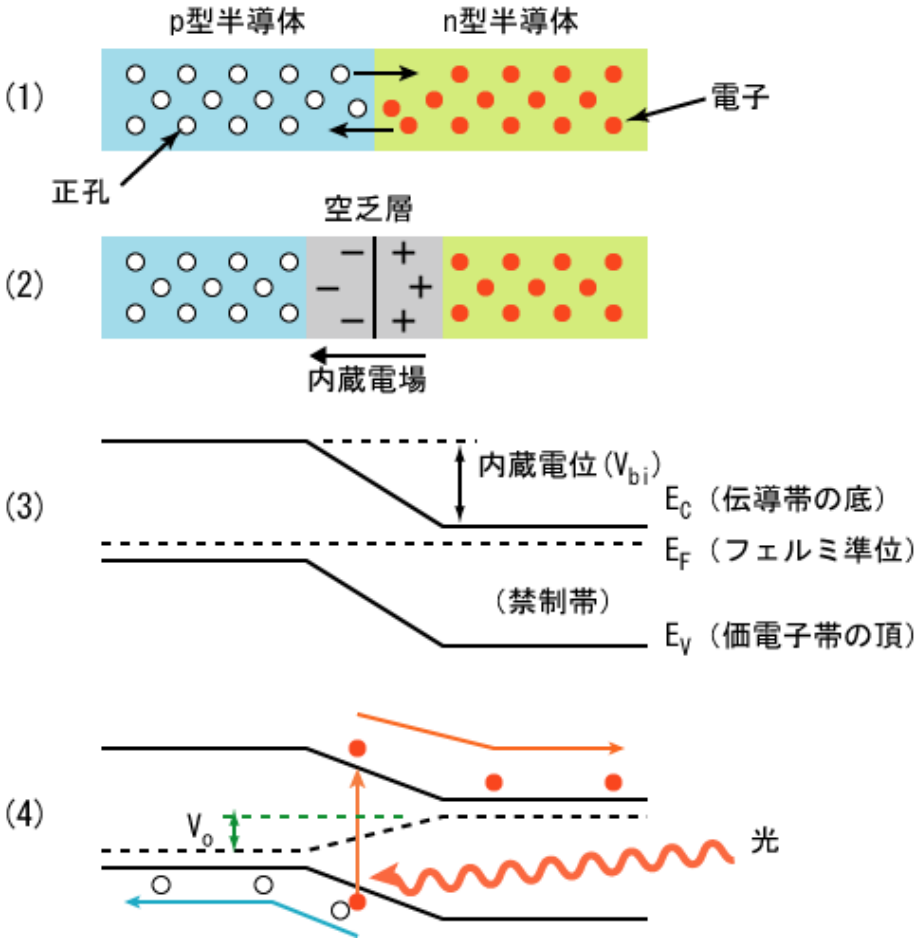


図 18.4: 太陽電池のバンド図

成される。これを**内蔵電場**という。この内部電場の存在が，太陽電池にとって重要である。前節でバンドギャップについて説明した。これよりも大きなエネルギーの光（光子，フォトン）が空乏層にあたると電子とホールの対が形成される。そのとき内部電場の存在により生成された電子は内部電場と逆方向の n 型側に追いやられる。一方ホールは，内蔵電場方向の p 型側に追いやられる。そのとき n 型側，p 型側に電極を付けておくとあたかも電池のような状況になって外部に電荷を取り出せる。これが太陽電池の原理である。図 18.4 は，太陽電池のバンド構造を示している。

現在市販されている太陽電池はシリコンを使って作製されている。シリコンのバンドギャップは 1.1eV である。これは，太陽光のスペクトル強度最大になるエネルギーにほぼ等しい。

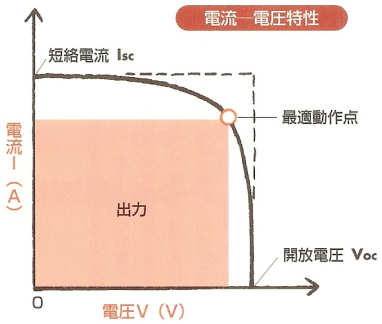


図 18.5: 太陽電池の電流電圧特性

18.1.3 太陽電池の特性

太陽電池の評価は，電流電圧測定から行う。この電流電圧特性から太陽電池の変換効率を求められる。ここで太陽電池に照射される光のエネルギーと太陽電池から取り出される電力の比を変換効率という。
太陽電池の電流電圧特性は，キセノンランプなど太陽光に見立てて太陽電池に照射させて測定される。変換効率は温度にも依存するので２５度に保たれる。またキセノンランプは，$0.1\mathrm{W/cm^2}$ にして行う。本実験では温度制御や擬似太陽光の強度調節は行えないので，擬似太陽光として白熱電球を用いる。太陽電池に負荷を繋げないで直接電流を取り出す場合を短絡電流 I_{sh} という。太陽電池電極両端を開放した場合の電圧を開放電圧 V_o という。電流電圧特性は，図 18.1.3 のようになる。電力は，電流と電圧の積で与えられる。太陽電池から取り出される最大出力は最適動作点で発生した電力である。太陽電池の変換効率は，これを入射光強度で割ったものである。また，最大出力を開放電圧と短絡電流の積で割った値を**曲線因子**（フィルファクター）と呼ぶ。通常は 70-80%程度である。本実験ではこのフィルファクターと最大出力を求めてみよう。

18.2 照度の測定

光源からの距離 r[m] と照度 Lu[lux] の関係を求める。

1. 光源（電源をオフにしておく）から照度計までの位置を測定する。
2. 光源を点灯して照度計の読みを記録する。
3. 上記の結果を縦軸に照度，横軸に距離を取ってグラフを書いてみなさい。

18.3　太陽電池の特性曲線

実験器具：太陽電池モジュール，直流電流計，直流電圧計，白熱電球，導線数本，可変抵抗器，ドライバー
実験方法
以下の実験では光源と太陽電池の距離を一定に保てるように注意して行うこと。

1. 短絡電流 I_{sh} の測定
    a. 図のように太陽電池の両端と直流電流計を接続する。
    b. 太陽電池に白熱電球の光を照射する。電流が最大になるように白熱電球の位置や照射角度を調節する。電流値が安定したらそれを短絡電流 I_{sh} とする。
2. 開放電圧 V_o の測定
    a. 短絡電流を求める測定配置で，電流計を直流電圧計で置き換える。太陽電池と白熱電球の位置は上記で最適化されているはずなのでなるべく動かさないように注意して交換しなさい。
    b. 電圧が安定したらその値を開放電圧 V_o としなさい。
3. 特性曲線の測定
    a. 図のように太陽電池モジュール，直流電流計，直流電圧計，可変抵抗器を接続する。そのとき白熱電球と太陽電池の相対位置がずれないように注意しなさい。
    b. ドライバーを使って可変抵抗器を回転させてなさい。そのときの電流と電圧を記録しなさい。
    c. 順次抵抗値を変化させながら電流と電圧の値を記録しなさい。
    d. 得られた電流値と電圧値の対を横軸電圧，縦軸電流としてグラフにプロットしなさい。そのさい１，２で求めた I_{sh} と V_o は，それぞれ電圧０及び電流０としてグラフに書き込みなさい。
4. テスターを使って直流電流計と直流電圧計の内部抵抗を測定しなさい。

18.4　課題

（１）以上の実験結果から最大電力を与える電流と電圧の値を求めなさい。最大電力を開放電圧と短絡電流の積 $(V_o \times I_{sh})$ で割りフィルファクター（FF）を算出しなさい。

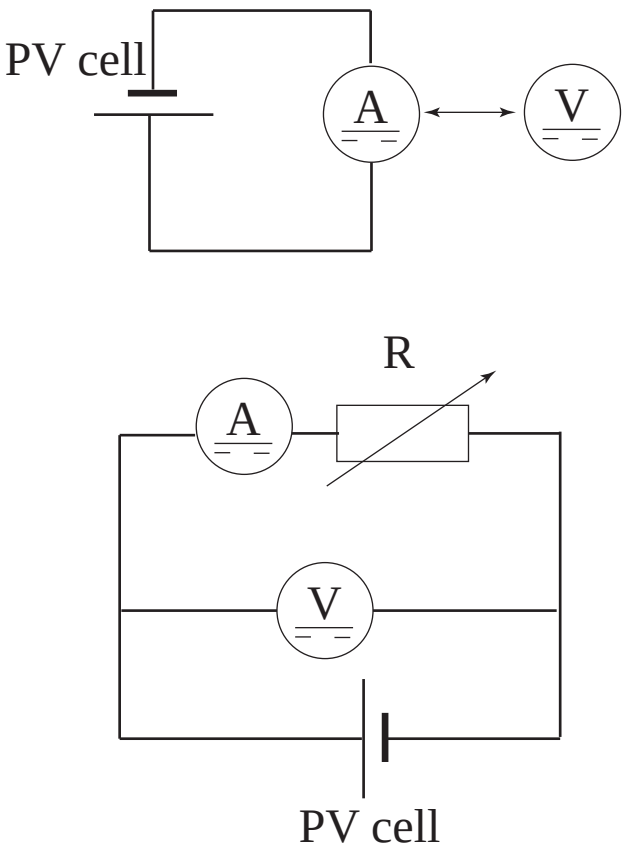


図 18.6: 太陽電池の特性曲線測定の配置図

（２）電流計と電圧計は，内部抵抗を持つ。負荷の大きさによっては，内部抵抗が測定値に影響を与えることもある。本実験で用いた電流計と電圧計の内部抵抗による影響を検討しなさい。
（３）本実験で使用したシリコン太陽電池以外の太陽電池を調べてその動作原理を説明しなさい。

参考文献

産業技術総合研究所太陽光発電研究センター編著「とことんやさしい太陽電池の本」，日刊工業（２００７）
阿部龍蔵著「電気伝導」，培風館

謝辞と参考文献

本実験指導書の作成にあたり，和歌山大学教育学部名誉教授・宮永健史先生に分担（単振り子，センサープロジェクト，コンデンサーの充放電）執筆して頂いた。また，以下の書籍を参考にさせて貰った。

1. 兵藤申一，物理実験者のための１３章，東京大学出版会
2. N.C. Barford (原著), 酒井 英行 訳，実験精度と誤差―測定の確からしさとは何か，丸善
3. ケンウッド　ティーエムアイ社マニュアル，アジレンドテクノロジー社マニュアル
4. 宇田川，永井，星野編「物理学基礎実験第二版」，共立出版